

Винахід належить до області радіоізотопних методів визначення вологості ґрунту в умовах його природного залягання (in situ), в інженерно-геологічних, гідромеліоративних та екологічних свердловинах, з урахуванням впливу на показання нейтронного вологоміра щільності (об'ємної маси) цього ґрунту.

Суть нейтрон-нейтронного метода за повільними нейтронами (ННМп) полягає в опроміненні досліджуваного ґрунту швидкими нейтронами стаціонарного джерела та реєстрації повільних нейтронів на певній відстані по стовбурі свердловини від джерела швидких нейтронів. Повільні нейтрони утворюються тут при взаємодії швидких нейтронів джерела з ядрами атомів хімічних елементів, що складають ґрунт. Найпомітніше сповільнення швидких нейтронів відбувається на ядрах атомів водню. Саме на цьому явищі ґрунтується визначення вологості ґрунту ННМп.

Показання детектора (вологоміра) знімають у вигляді швидкості лічби повільних нейтронів (імп/с), частіше у дискретній формі. Свердловинні нейтронні вологоміри у таких дослідженнях працюють у доінверсійній області довжин зонда (відстані від джерела до середини довжини лічильника нейтронів). У цій області збільшення об'ємної вологості ґрунту W_v (%) приводить до зростання показань вологоміра I_0 (імп/с). Графічно градувальні залежності таких вологомірів наближаються до прямої лінії, зі зменшенням довжини зонда L до нульового значення. Для таких вологомірів, при сталій щільності сухого ґрунту (скелету ґрунту), при відсутності хімічно зв'язаного ґрунтом водню (глинистих мінералів та органічної речовини) і при відсутності в ньому аномальних поглиначів теплових нейтронів, існує однозначна залежність між I_0 та W_v ґрунту

$$I_0 = f(W_v) \quad (1)$$

Однак, щільність ґрунту не є сталою у його геологічному розрізі. Тут ґрунт однієї і тієї ж вологості може характеризуватись різною щільністю, що приводить до похибок у визначенні його вологості. За даними Olgaard P.L. [1], зміна щільності сухого ґрунту ρ_d (г/см³) на 0,1 г/см³ приводить до зміни I_0 на величину, що відповідає зміні вологості (похибки її визначення за повільними нейтронами), рівної 0,8 % для $W_v = 5\%$ і 16% для $W_v = 35\%$. В діапазоні зміни ρ_d піщано-глинистих ґрунтів, який частіше становить 1,3-1,8 г/см³, абсолютна похибка визначення W_v ґрунту, зумовлена зміною його щільності, може сягати 8 % і більше. Це підтверджують і наші розрахунки швидкості лічби повільних нейтронів I_0 , імп/с для приладу вологомір поверхнево-глибинний радіоізотопний (ВГТГР-1, [2]) (за програмою CORA, автори В.В. Кулик, Ю.В. Яковлев, Т.М. Гусак, ІГФ НАН України) для піщаного середовища при заданих значеннях його вологості і змінних значеннях щільності, фіг. 1.

На фіг. 1 показана залежність приросту швидкості лічби повільних нейтронів зумовленого щільністю сухого ґрунту при заданих значеннях його об'ємної вологості.

Greacen E.L. and Schrale G. [3] запропонували такий поправковий коефіцієнт на щільність сухого ґрунту k до показань нейтронного вологоміра,

$$k = \sqrt{\frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d^i}} \quad (2)$$

де $\bar{\rho}_d$ - середнє значення щільності сухого ґрунту у вертикальному геологічному розрізі досліджуваної ділянки;

ρ_d^i - щільність сухого ґрунту i -ого шару цієї ділянки.

Суть цього способу полягає у врахуванні відхилення щільності сухого ґрунту i -ого шару від середньої щільності сухого ґрунту у досліджуваному його геологічному розрізі, для якої будувалась градувальна залежність вологоміра (компенсаційний спосіб).

Відкоригований інтерпретаційний параметр градувальної залежності $I(W_v)$ у цьому випадку має вигляд:

$$I = I_0 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d^i}} \quad (3)$$

де I_0 - швидкість лічби нейтронів, виміряна вологоміром (показання вологоміра).

Недоліком способу [3] є те, що визначення ρ_d , яке входить до виразу (3), потребує відбирання проб ґрунту із шурфів та лабораторних вимірювань їх щільності. Більш вагомим його недоліком є неоднозначність коефіцієнта k , визначеного для певного горизонту ґрунту, при різних потужностях досліджуваного шару цього ґрунту і різних його літології.

Відомий також спосіб врахування щільності ґрунту, який полягає у наступному. ДСТУ Б В. 2.1-26:2009 [4] пропонує для врахування щільності ґрунту, інтерпретацію показань нейтронного вологоміра виконувати за сімейством градувальних залежностей I_0 від W_v , для значень ρ_d рівних 0,9; 1,2; 1,5; 1,8 та 2,1 г/см³. Для кожного значення ρ_d справджується однозначна залежність (1). Суть способу, запропонованого в роботі [4], полягає у підборі із сімейства такої залежності, яка побудована для щільності максимально наближеної до щільності ґрунту на горизонті визначення його вологості W_v

(спосіб вибору оптимальної градувальної залежності). Користуватися сімейством градувальних залежностей [4] рекомендує таким чином.

За орієнтовно вибраним графіком із сімейства градувальних залежностей вологоміра знаходять перше наближення W_V . За наступними графіками, для яких ρ_d більше на $0,3 \text{ г/см}^3$ та менше на $0,3 \text{ г/см}^3$, знаходять друге наближення W_V . Якщо друге наближення відрізняється від першого на величину $\Delta W_V \leq 1\%$ абсолютного значення W_V , то його (перше наближення) приймають за реальне значення вологості ґрунту. В іншому випадку знаходять третє наближення W_V за другим і третім вибраними графіками. Порівнюють друге і третє наближення W_V . Так продовжують випробовувати графіки залежностей I_0 від W_V , поки чергове наближення W_V буде відрізнятися від попереднього на величину $\Delta W_V \leq 1\%$. Основним недоліком способу [4] є те, що він не забезпечує високої точності визначення об'ємної вологості ґрунту ($\Delta W_V \leq 1\%$) і є трудомістким.

Найближчим аналогом пропонованого винаходу є спосіб визначення вологості ґрунту з врахуванням його щільності (Патент України на винахід №95164, Бюл. № 13, 2011 р.), який вибрано за прототип.

Недоліками прототипу є недостатня оперативність і точність радіоізотопних вимірювань об'ємної вологості ґрунту, ускладнена процедура інтерпретації, підвищена вартість робіт.

Задачею винаходу є вдосконалення і спрощення інтерпретації показань нейтронного вологоміра та підвищення точності визначення об'ємної вологості ґрунту. При вимірюваннях вологості ґрунту нейтронним вологоміром на вході вимірювальної системи є ґрунт різної вологості і швидкі нейтрони джерела. Кінцевим результатом складної взаємодії нейтронів джерела з ґрунтом, тобто на виході вимірювальної системи, є швидкість лічби вологоміром повільних нейтронів.

Швидкість лічби повільних нейтронів у вологому ґрунті, в якому відсутні аномальні поглиначі теплових нейтронів і зв'язаний його мінеральною частиною водень (відсутні глинисті мінерали і органічна речовина), можна подати так:

$$I_0(W_V, \rho_d) = I(W_V) + I(\rho_d), \quad (4)$$

де $I(W_V)$ - компонент швидкості лічби, зумовлений вологістю ґрунту W_V ;

$I(\rho_d)$ - компонент швидкості лічби вологоміра, зумовлений щільністю сухого ґрунту ρ_d (усереднений ефект збільшення швидкості лічби повільних нейтронів, зумовлений скелетом ґрунту).

Ідентифікація тієї частини швидкості лічби повільних нейтронів, яка спричинена скелетом ґрунту, лягла в основу пропонованого нами адитивного способу врахування поправки на щільність ґрунту, при визначенні його вологості нейтронним вологоміром (адитивний спосіб, оснований на ідентифікації швидкості лічби повільних нейтронів, зумовленої щільністю ґрунту).

За даними [1] і нашими розрахунками, фіг. 1, видно, що швидкість лічби вологоміра $I(\rho_d)$, зумовлена щільністю ґрунту ρ_d при $W_V = 0\%$, позначимо її $I_1(\rho_d)$, і складовою $I_2(\rho_d, W_V)$, спричиненою посиленням взаємодії нейтронів з мінеральною частиною вологого ґрунту.

Складову швидкості лічби вологоміра, зумовлену щільністю ґрунту ρ_d , можна записати так, $I(\rho_d) = I_1(\rho_d) + I_2(\rho_d, W_V)$. (5)

Формула (4) набуває вигляду:

$$I_0(W_V, \rho_d) = I(W_V) + I_1(\rho_d) + I_2(\rho_d, W_V). \quad (6)$$

Для вологоміра ВПГР-1 (потужність джерела нейтронів $Q = 4,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, детектор нейтронів типу СНМ-17) [2], розрахункова залежність $I_1(\rho_d)$ від щільності сухого ($W_V = 0\%$) піщаного ґрунту ρ_d , виявилась такою:

$$I_1(\rho_d) = 38,13\rho_d - 26,06. \quad (7)$$

Складова $I_2(\rho_d, W_V)$ залежить і від ρ_d і від W_V ґрунту. Для неї ми встановили такий вираз:

$$I_2(\rho_d, W_V) = I_1(\rho_d) B \ln W_V, \quad (8)$$

де B - стала величина;

$\ln W_V$ - логарифм значення об'ємної вологості.

Із залежностей (4) - (8) для інтерпретаційного параметру маємо:

$$I(W_V) = I_0(W_V, \rho_d) - [I_1(\rho_d) + I_1(\rho_d) B \ln W_V]. \quad (9)$$

Складова у формулі (9), виділена квадратними дужками, трансформується у похибку визначення вологості ґрунту нейтронним вологоміром, спричинену його скелетом. Величину множника B ми визначили, скориставшись даними Olgaard P.L. [1], зокрема про те, що при W_V ґрунту рівному 35 %, похибка визначення його вологості, зумовлена ρ_d , збільшується у 2 рази, в порівнянні з такою ж при вологості цього ґрунту, рівній 5 %.

Виходячи з цих даних Olgaard P.L. і враховуючи формули (5) і (8) можна записати:

$$\frac{2(l_1 + l_1 B \ln 5)}{S_a} = \frac{l_1 + l_1 B \ln 35}{S_a}, \quad (10)$$

де S_a - абсолютна чутливість нейтронного вологоміра до вологості ґрунту (імп/с · %).

Після спрощень рівняння (10) набуває вигляду:

$$B = 1/(\ln 35 - 2 \ln 5). \quad (11)$$

Множник (коефіцієнт) B виявився рівним 0,3.

Оскільки потужність джерела нейтронів, що використовується у конкретному вологомірі, дають з деякою похибкою, потрібно зробити прив'язку (погодження) експериментальної градуовальної залежності вологоміра до розрахункової, виконаної за паспортним значенням потужності джерела.

Прив'язку роблять за складовою $l_1(\rho_d)$, виміряну в моделі "сухий кварцовий пісок" ($W_V = 0\%; l(W_V) = 0 \text{ імп/с}; l_2(\rho_d, W_V) = 0 \text{ імп/с}; l_1(\rho_d) = l_0(\rho_d)$). Габарити моделі мають задовольняти умовам глибинності досліджень ґрунту ННМп, а діаметр тонкостінної алюмінієвої обсадної труби, що імітує необсажену свердловину - діаметру цієї свердловини.

Так, для використаного нами вологоміра, швидкість лічби в моделі "сухий кварцовий пісок" ($\rho_d = 1,57 \text{ г/см}^3; W_V = 0,15\%$) виявилась рівною 39 імп/с, з них $8,2 \cdot 0,15 = 1,23$ імп/с зумовлені вологістю піску (8,2 - абсолютна чутливість нашого вологоміра до вологості ґрунту, імп/с · %). Сухим піском створюється швидкість лічби $39 - 1,23 = 37,8$ імп/с.

Розрахункова швидкість лічби вологоміра (паспортне значення $Q = 4,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$) у сухому піску $l_1(\rho_d) = l_0(\rho_d) = 33,8 \text{ імп/с}$, фіг. 1. Отже, коефіцієнт погодженості експериментальної градуовальної залежності з розрахунковою $K_n = 37,8 : 33,8 = 1,1175$.

З урахуванням коефіцієнта погодженості, вираз (9) для використаного вологоміра буде таким:

$$l(W_V) = l_0(W_V, \rho_d) - [(42,6\rho_d - 29,1) + (42,6\rho_d - 29,1)B \ln W_V]. \quad (12)$$

Його використовують для побудови градуовальної залежності нейтронного вологоміра.

На фіг. 2 приведена градуовальна залежність для використаного нами вологоміра ВПГР-1, побудована за співвідношенням (12), для вимірювань в необсаженій свердловині діаметром 50 мм, єдина для всього інтервалу можливих змін ρ_d . Параметри W_V і ρ_d визначають лабораторно.

Використання співвідношення (12) значно спрощує градування нейтронного вологоміра, підвищує точність градуовальної залежності. Однак, внесення поправки на щільність ґрунту при свердловинних визначеннях його вологості нейтронним вологоміром на основі (12), а по суті на основі лабораторного визначення параметрів W_V і ρ_d , трудно здійснене.

Нами трансформовано рівняння (12) до вигляду:

$$- [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^n \rho_B) - 29,1] K_2 \ln W_V^n. \quad (13)$$

В цій формулі: ρ , г/см^3 - щільність природного ґрунту, визначена за допомогою гамма-щільноміра;

ρ_B , г/см^3 - щільність прісної води;

W_V^n , % - позірна вологість ґрунту, визначена за допомогою нейтронного вологоміра за градуовальною залежністю $l(W_V) = f(W_V)$, (формула (12)), та його показаннями $l_0(W_V, \rho_d)$;

K_1 і K_2 - трансформаційні коефіцієнти.

Оскільки $W_V^n > W_V$, множник $(\rho - 0,01 W_V^n \rho_B)$ у виразі (13) менший ρ_d , ($\rho_d = \rho - 0,01 W_V \rho_B$), то це веде до деякого зменшення швидкості лічби $l_0(W_V, \rho_d)$. Та воно практично повністю компенсується множителем K_1 , який визначають з виразу,

$$(42,6\rho_d - 29,1) = [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^n \rho_B) - 29,1] K_1. \quad (14)$$

З цієї ж причини, $(W_V^n > W_V)$, множник $\ln W_V^n > \ln W_V$, що веде до певного зростання швидкості лічби $l_0(W_V, \rho_d)$, при одночасному зменшенні її за рахунок множника $(\rho - 0,01 W_V^n \rho_B)$. Ці зміни K_2 компенсують введенням коефіцієнта K_2 . Величину його визначають з виразу

$$[42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^n \rho_B) - 29,1] K_2 \ln W_V^n = (42,6\rho_d - 29,1) B \ln W_V. \quad (15)$$

Нами розраховані коефіцієнти K_1 і K_2 для ρ_d , рівних 1,2; 1,4 і 1,6 г/см^3 , та W_V ґрунту, рівних 5; 10; 20; 30 і 35 %.

Встановлено, що коефіцієнти K_1 і K_2 в певній мірі залежать від вологості W_V , а коефіцієнт K_2 і від щільності ґрунту ρ_d . В (13) використовують їх середнє значення, визначене для діапазону вологості (10-30 %) і щільності скелету (сухої частини) ґрунту (1,2-1,6 г/см^3). В наведеному діапазоні значень W_V і ρ_d

середня величина коефіцієнта $K_1^c = 1108$, а $K_2^c = 0,988$.

Нами досліджені зміни складових $I_1(\rho_d)$ та $I_2(\rho_d, W_V)$, при використанні в (13) замість істинних значень коефіцієнтів K_1 і K_2 , їх середні значення K_1^c і K_2^c та трансформації цих змін швидкостей лічби у похибки визначення вологості за (12).

Складова $I_1(\rho_d)$ в (13), а саме $I_1(\rho_d) = [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^n \rho_B) - 29,1] K_1$, визначена за K_1^c , наприклад для $\rho_d = 1,60$ г/см³ і $W_V = 30\%$, дорівнює 38,74 імп/с. Ця ж складова, визначена за K_1 , ($K_1 = 1117$), для $\rho_d = 1,60$ г/см³ і $W_V = 30\%$, дорівнює 39,05 імп/с. Різниця цих швидкостей лічби, віднесена до абсолютної чутливості вологоміра ($S_a = 8,2 \text{ с}^{-1}/\%$) є похибкою визначення вологості ґрунту, зумовлену відхиленням коефіцієнта K_1 від його середнього значення - $\Delta W_V(K_1) = 0,0378\%$.

Так же, розрахована похибка $\Delta W_V(K_2)$ для складової $I_2(\rho_d, W_V)$, залежності (13), а саме $I_2(W_V, \rho_d) = [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^n \rho_B) - 29,1] K_2 \ln W_V^n$, і тих же фізичних параметрів ґрунту ($\rho_d = 1,60$ г/см³ і $W_V = 30\%$), виявилась такою - $\Delta W_V(K_2) = 0,21\%$.

І, нарешті, похибка $\Delta W_V(K_1, K_2)$, зумовлена заміною у залежності (13), дійсних значень коефіцієнтів K_1 і K_2 на їх середні значення, склала 0,25 %.

В цілому ж, похибка визначення вологості ґрунту за інтерпретаційною залежністю (13), замість інтерпретаційної залежності (12), виявилась малою, при порівнянні її з допустимою похибкою визначення об'ємної вологості ґрунту радіоізотопними методами ($\Delta W_V = \pm 2\%$). Побудовані за ними градувальні залежності практично співпадають між собою.

Це дозволяє будувати градувальну залежність нейтронного вологоміра за (12), тобто на основі класичних термо-вагових визначень щільності скелету ґрунту ρ_d і його вологості W_V , а інтерпретаційний параметр свердловинних вимірювань $I(W_V)$ знаходити за співвідношенням (13).

Параметр ρ для досліджуваних шарів ґрунту визначають за допомогою радіоізотопного гамма-гамма-щільноміра (наприклад типу ППГР-1). Параметр W_V^n визначають за показаннями нейтронного вологоміра - $I_0(W_V, \rho_d)$, скориставшись графіком фіг. 2. Розрахований за залежністю (13) параметр $I(W_V)$ інтерпретують за тим же графіком фіг. 2.

Спосіб випробувано на дослідному майданчику Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. У приповерхневому шарі ґрунту тут складені важким супіском, який з глибини 110 см переходить у пісок. Випробування виконано за допомогою нейтронного вологоміра типу ВПГР-1 у необсадженої свердловині діаметром 50 мм.

Інтерпретацію свердловинних вимірювань вологоміром виконано за співвідношенням (13). За цим співвідношенням визначали сумарний інтерпретаційний параметр $I(W_V^c) = I(W_V) + I(W_V^{x.3})$, де $I(W_V^{x.3})$ - еквівалент хімічно зв'язаної води глинистих мінералів]. Параметр $W_V^{x.3}$ знаходять за гамма-каротажем (ГК) вимірюванням коефіцієнта глинистості ґрунту та ННК вимірюванням його сумарної вологості [5]. При градуванні вологоміра та контрольних вимірюваннях у свердловині $W_V^{x.3}$ визначають лабораторно (термо-ваговим способом з дотриманням рекомендацій [4]). Визначені нами лабораторно величини $W_V^{x.3}$ для важкого супіску дослідного майданчика виявилися рівними 0,7 % об'ємної вологості, в інтервалі глибин 50-70 см, і 1,5 % - в інтервалі глибин 80-100 см. Результати інтерпретації вимірювань на дослідному майданчику представлені на фіг. 3.

На фіг. 3 показано розподіл сумарної вологості ґрунту в геологічному розрізі свердловини. На цій фігурі позначено: 1 - об'ємна вологість ґрунту визначена за (13); 2 - вологість ґрунту визначена за термо-ваговим способом; 3 - насипний ґрунт; 4 - важкий супісок; 5 - пісок глинистий.

З фіг. 3 видно, що вологість ґрунту, визначена нейтронним вологоміром, співпала з її контрольними вимірюваннями термо-ваговим способом (за разом і хімічно зв'язаної води глинистих мінералів). Розходження визначень вологості ґрунту нейтронним вологоміром і класичним термо-ваговим способом не перевищують 1 %.

Технічним результатом винаходу є те, що: 1) поправковий коефіцієнт до показань нейтронного вологоміра визначають на основі вимірювань гамма-гамма-щільноміром, тобто, без відбирання монолітів ґрунту та їх лабораторних досліджень; 2) спосіб істотно спрощує інтерпретацію радіоізотопних вимірювань, підвищує її оперативність; 3) спосіб підвищує точність радіоізотопних вимірювань об'ємної вологості ґрунту; 4) запропонований спосіб знижує вартість нейтронного каротажу вологості ґрунту.

Джерела інформації:

1. Olgaard P.L. On the theory of the neutronic method for measuring the water content soil. // Riso Rept, № 97, Copenhagen, 1965.-44 p.

2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Влагомер поверхностно-глубинный радиоизотопный ВПГР-1 / Изд. "Полтава", 1982.-43с.
3. Greacen E.L. and Schrale G. The effect of bulk density on neutron meter calibration // Australian Journal of Soil Research.-1976. - №14. - P. 159-169.
4. ДСТУ Б В. 2.1-26:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи радіоізотопного вимірювання щільності і вологості. - Введ. 01.10.2010.
5. Кулик В. Адитивний і мультиплікативний способи врахування глинистості порід при визначенні їх пористості за допомогою нейтронного і акустичного каротажу // В. Кулик, М. Бондаренко, Г. Кашуба, О. Стасів /Вісник КНУ ім. Т.Г. Шевченка, сер. "Геологія". - 2008, - Вип. 45. - С. 34-38.

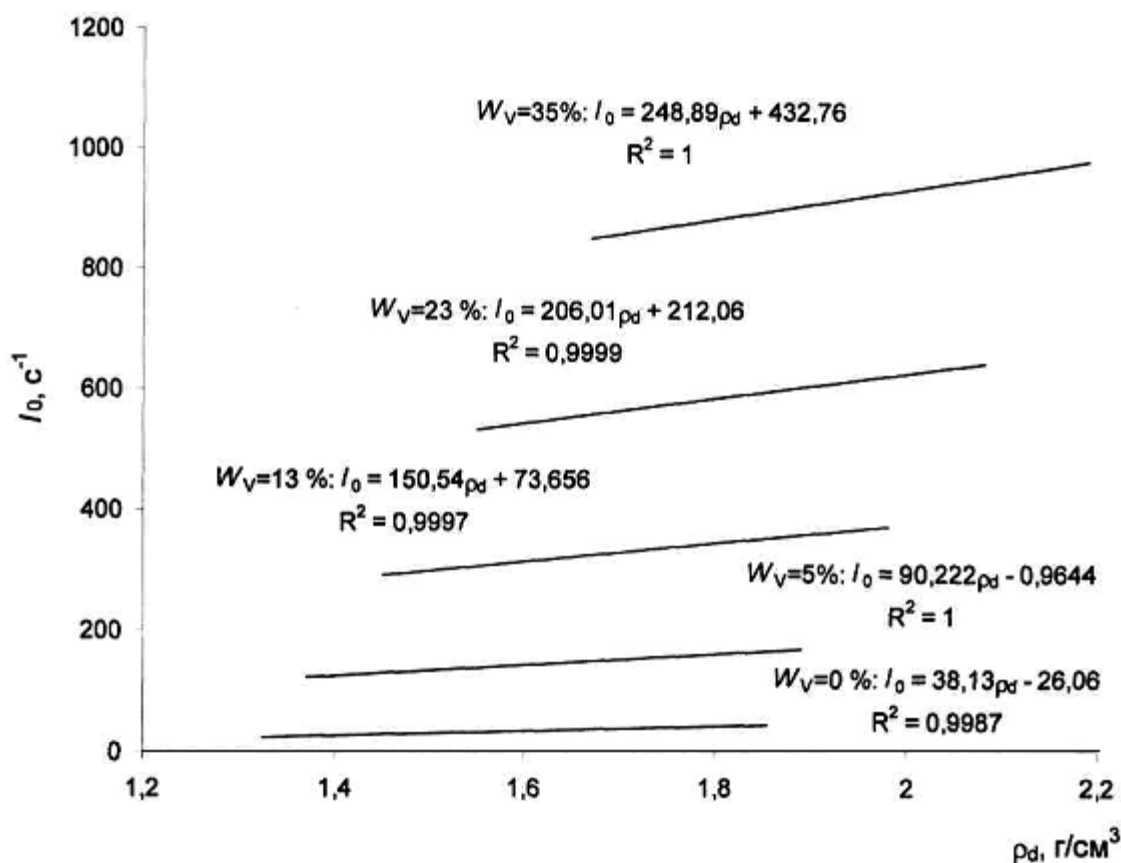


Fig. 1

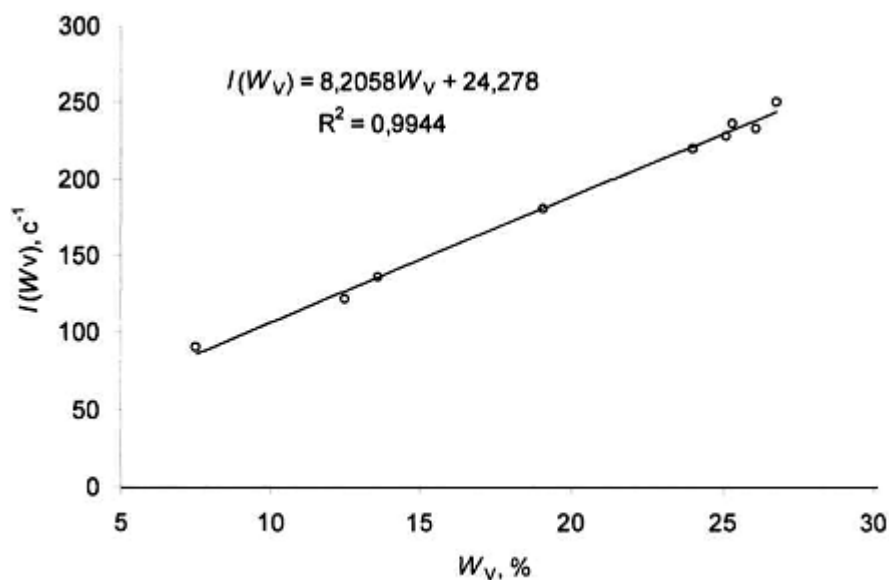
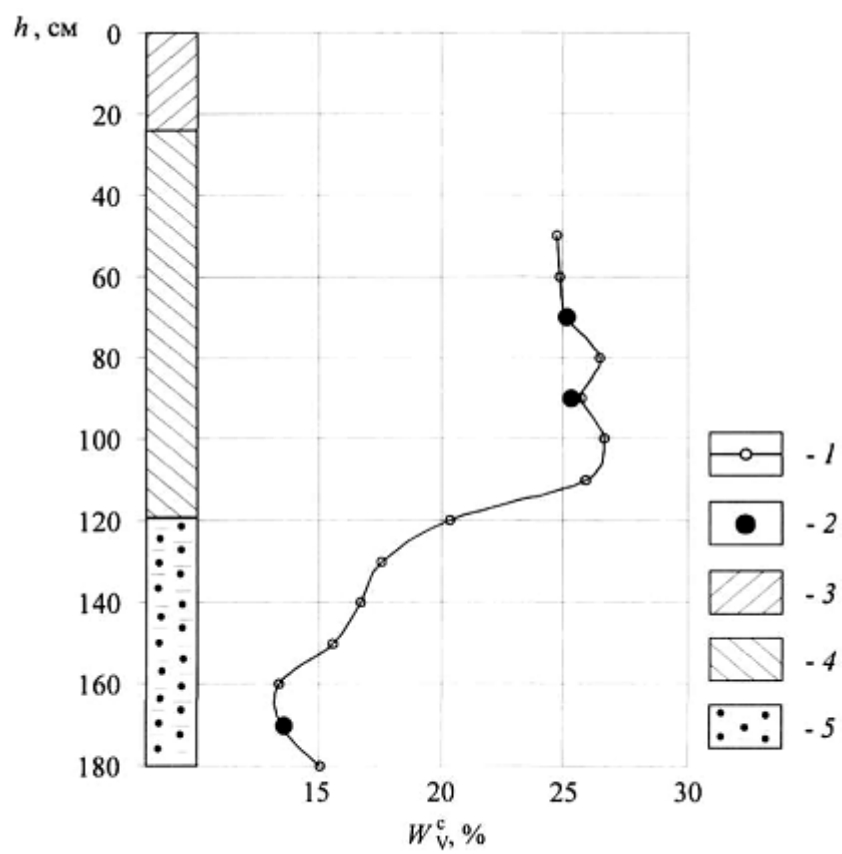


Fig. 2



Фиг. 3