

УДК 539.3

І.Г. Грабар, д.т.н., проф.
Ю.О. Кубрак, аспір.*Житомирський державний технологічний університет*

**ТЕРМОРОЗШИРЕНИЙ ГРАФІТ ЧИ ШУНГІТ –
ЯКА ПРОВІДНИКОВА КОМПОНЕНТА КРАЩА ДЛЯ ДЕФОРМОВАНИХ
ПЕРКОЛЯЦІЙНО-ФРАКТАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ?**

Показано, що використання шунгіту як струмопровідної компоненти в перколяційно-фрактальних середовищах дає певний ряд переваг порад з використанням терморозширеного графіту. В статті наведені порівняльні характеристики датчиків, побудованих на основі шунгіту та графіту, при повздовжніх деформаціях і при навантаженні тиском.

В останні роки в науковій літературі значна увага приділяється вивченню перколяційних та перколяційно-фрактальних структур. Ці структури все частіше використовують для опису різноманітних явищ: поширення епідемій в популяції, поведження магнітів, що містять домішки, описи гелів та інших [1–13].

Нами запропоновано вирішення проблем виміру деформації за допомогою деформованих перколяційно-фрактальних середовищ.

До цього часу для перетворення механічних переміщень та деформацій в електричні сигнали використовуються перетворювачі, побудовані на провідникових, фольгових та плівкових тензодатчиках опору, що мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних, в першу чергу, з малою чутливістю і необхідністю підсилення вихідного сигналу. Використання як датчика системи на основі перколяційно-фрактальної суміші дає надзвичайно широкі можливості у вимірюванні даних величин і відкине більшість недоліків, пов'язаних з класичними засобами тензометрування.

Використання електропровідної компоненти як однієї з складових двокомпонентної перколяційно-фрактальної суміші відкриває можливості для використання даного матеріалу для:

- власне об'єкта дослідження деформацій;
- матеріалу для нагрівачів з будь-якою конфігурацією температурного поля;
- матеріалу для датчиків для дослідження деформацій будь-якої чутливості;
- матеріалу для сенсорів;
- композитного матеріалу для виготовлення надлегких струмопровідних систем.

Нами розроблена методологія розрахунків та методологія виготовлення перколяційно-фрактальних датчиків (ПФД) будь-якої чутливості.

Ідея методу полягає в нанесенні і закріпленні на необхідну область з контуром D довільної конфігурації двокомпонентної суміші мікрочастинок типу «провідник-діелектрик». При цьому обов'язково повинна виконуватись умова перевищення провідної компоненти порога перколяції (для плоскої системи $P_* = 0,59$). У заданих точках контуру D приєднуються контакти зі з'єднувальними проводами.

В науковій літературі близько двадцяти років розглядаються перколяційно-фрактальні середовища [1]–[6], на основі яких було створено ПФД [14].

Встановлено, що миттєве значення опору датчика збігається з теоретичним значенням:

$$\frac{R}{R_0} \cong \left[\frac{1 - P_*}{P - P_*} \frac{1 + \varepsilon}{1 - \mu \varepsilon} \right]^\nu,$$

де R , R_0 – електричний опір деформованого і недеформованого середовища; ε – деформація; μ – коефіцієнт Пуассона підкладки; ν – критичний індекс (для плоскої системи – $\nu \cong 1$) [10].

Було проведено дослідження механічних, електро-фізичних, радіологічних і релаксаційних властивостей зазначених систем. В попередніх роботах, переважній частині, досліджувались системи типу терморозширений графіт (ТРГ)–гума шляхом навантаження повздовжніми деформаціями.

Було встановлено, що деформування підкладки (шкіра, гума, полімери) призводить до різкого сплеску опору датчика з наступною стабілізацією в часі. При цьому співвідношення R_{st}/R_{max} коливається в діапазоні 0,5...0,95. Отримано закономірності зміни опору ПФД при:

- одноосьовому і двоохсьовому деформуванні підкладки в умовах циклічного, тривалого і повторно-короткочасного навантаження;
- примусовій зміні товщини перколяційно-фрактального шару (динамічним і статичним сплюсцуванням).

Вперше були наведені результати досліджень опору деформованих перколяційно-фрактальних середовищ струмами високої частоти і побудована математична модель $R(f, \varepsilon)$, а також встановлені границі застосування даної моделі [13].

Побудова ПФД пов'язана з проблемою стабільності характеристик, що з нашої точки зору, пов'язано перш за все з фрактальною природою провідникової компоненти (ТРГ), реологічними особливостями підкладки. Таким чином ми вважаємо за необхідне порівняти характеристики перколяційно-фрактальних систем з різними провідниковими складовими на різних видах підкладок.

Метою даної роботи є порівняння характеристик перколяційно-фрактальних середовищ з графітовою і шунгітовою провідниковою складовою і проведення дослідження впливу циклічного стискування на зазначені перколяційно-фрактальні системи.

Як провідник в даних датчиках гарно зарекомендували себе такі матеріали, як ТРГ і шунгіт. Перший має унікальні властивості, високу хімічну, електрохімічну і термічну стійкість, можливість отримання його у дисперсній і компактній формі, доступність і низьку вартість сировини [7].

Шунгітові породи – унікальні за складом, структурою і властивостями утворення. Вони являють собою незвичайний за структурою природний композит – рівномірний розподіл високодисперсних кристалічних силікатних часток в аморфній вуглецевій матриці. Середній розмір силікатних часток близько 1 мкм. Середній склад порід родовища – 30 % вуглецю і 70 % силікатів. Породи характеризуються високою міцністю, щільністю, хімічною стійкістю й електропровідністю. Вони володіють рядом незвичайних фізичних, хімічних, фізико-хімічних і технологічних властивостей.

Композиційні шунгітові радіоекрануючі матеріали здатні забезпечити ослаблення електромагнітної енергії в діапазоні більше 100 МГц на рівні не менше 100 дБ. У порівнянні з металевими матеріалами мають екологічні переваги, тому що не створюють магнітне поле Землі і виключають можливість виникнення значних напруг за рахунок резонансних явищ. Шунгітові радіоекрани можуть використовуватись в житлових приміщеннях.

Шунгітові електропровідні матеріали як нагрівачі малої питомої потужності безпечні в пожежному й опіковому відношенні екологічно безпечні, можуть використовуватись для будівництва теплих підлог та інших поверхонь приміщень, що обігріваються.

Як діелектрик використовувалась гума або повітря (пустоти між частинками провідника). Перколяційно-фрактальна суміш закріплювалась на гумовій, шкіряній, поліетиленовій та інших підкладках.

Все вищевикладене дозволяє з урахуванням надзвичайно високої чутливості створити новий клас особливо чутливих пристроїв для вирішення задач тензометрування (тензодатчики для механіки і біомеханіки, сенсорні пристрої, перетворювачі), а також вказує на необхідність інтенсивного дослідження шунгіту.

Дана робота є логічним продовженням роботи [13]. В цій роботі наведені результати дослідження впливу циклічних навантажень ($f = 1 \text{ с}^{-1}$) при повздовжніх деформаціях 0–1,5 %, а також вплив тиску на ПФД в діапазоні зусиль стискування 0–70 Н/см² на перколяційно-фрактальні системи з шунгітовою та графітовою провідниковою компонентою.

На рис. 1 наведено криві стабілізації датчиків з ТРГ-провідниковою компонентою і з шунгітовою після навантаження їх зусиллям 70 Н/см². Розмір датчиків складає 10x3 см. Після порівняння кривих при стискуванні з кривими стабілізації після повздовжнього деформування (рис. 2) можна зробити висновок про подібність даних результатів. Всі криві описуються функцією:

$$R(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^b, \quad (1)$$

де a і b – константи.

Аналогічно подібні криві верхньої огинаючої при циклічному навантаженні даних зразків (рис. 3). Наведені результати свідчать про можливість використання ПФД як для тензометрування, так і для датчиків тиску.

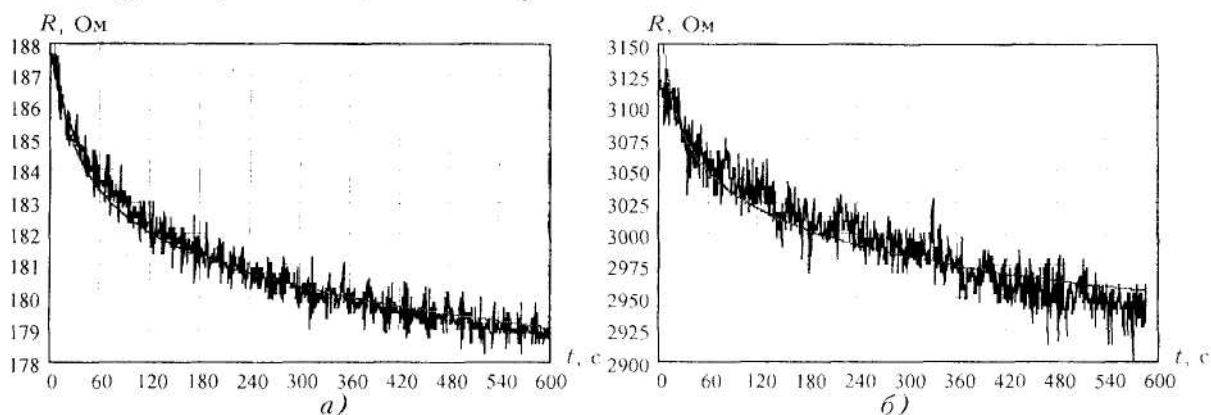


Рис. 1. Стабілізація опору зразків на ТРГ основі (а) і на шумітовій (б) після навантаження 70 Н/см²

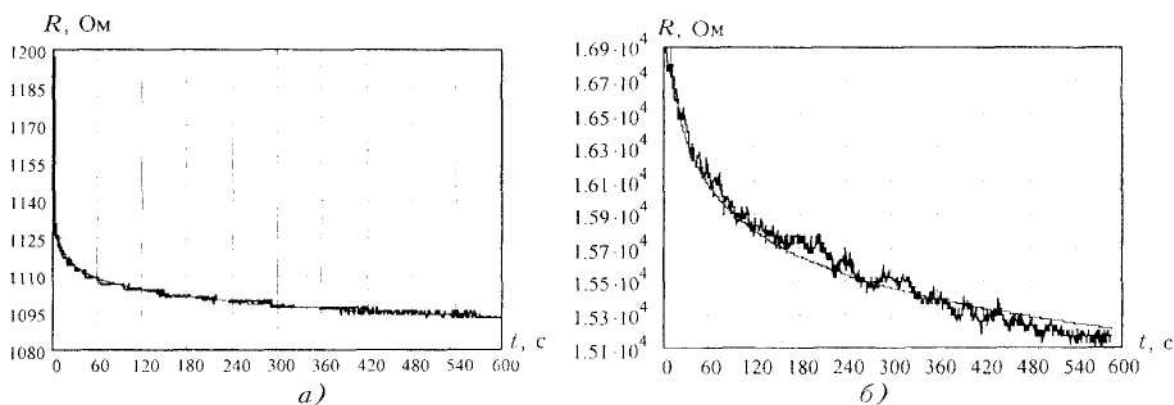


Рис. 2. Стабілізація опору зразків на ТРГ основі (а) і на шумітовій (б) після деформування 1,5 мм

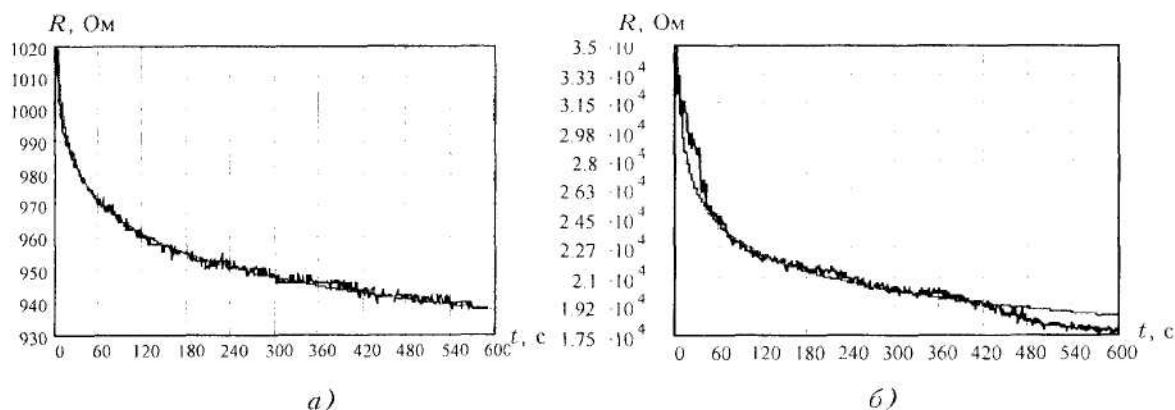


Рис. 3. Циклічне навантаження зразків деформацією 1,5 мм:

- а) апроксимована верхня огинаюча при дослідженні зразка на ТРГ основі;
- б) апроксимована верхня огинаюча при дослідженні зразка на шумітовій основі

Порівняльний аналіз коефіцієнтів падіння опору K при стабілізації зразків після навантаження тиском та при деформуванні (табл. 1) оцінювали за співвідношенням:

$$K = \frac{R_{\max} - R_{st}}{R_{\max}} \cdot 100 \% , \tag{2}$$

де R_{\max} – опір зразка після навантаження; R_{st} – опір після 10 хвилин стабілізації. Тобто коефіцієнт K показує, наскільки змінився опір зразка під час стабілізації.

Таблиця 1

Коефіцієнт зміни опору зразків під час стабілізації

	Шкіряна підкладка (ТРГ)	Гумова підкладка (ТРГ)	Гумова підкладка (шунгіт)	Гумова підкладка (графіт)
Навантаження тиском	5,3 %	7,0 %	6,6 %	5,8 %
Деформування	8,3 %	6,5 %	10,6 %	7,7 %

Аналіз інших зразків датчиків як на гумовій, шкіряній, так і на іншого виду підкладках показує, що коефіцієнт K в середньому має значення близько 6,5 %. Вид кривих при стабілізації має схожий характер (табл. 3). Наведені результати свідчать про незначний вплив даних підкладок на значення K . Тільки при шунгітовій електропровідній компоненті $K = 10,6 %$. На це впливає більш низька електропровідність шунгіту. Саме завдяки цьому коефіцієнт підсилення при використанні як електропровідної компоненти шунгіту \approx в 15 разів вище, ніж при використанні в цій якості ТРГ. Це пояснюється більш різким розривом електричних зв'язків при деформуванні зразків, де електропровідна компонента має меншу електропровідність.

Аналогічні закономірності можна спостерігати при аналізі верхніх огинаючих при циклічному навантаженні даних зразків. Значення коефіцієнтів K , що наведені в таблиці 2, для кривих циклічного навантаження (провідник – ТРГ) мають в середньому значення близько 12 %. Але для датчиків з шунгітовою електропровідною складовою це значення сягає 50 %.

Таблиця 2

Коефіцієнт зміни опору зразків під час циклічного навантаження

	Шкіряна підкладка (ТРГ)	Гумова підкладка (ТРГ)	Гумова підкладка (шунгіт)	Гумова підкладка (графіт)
Навантаження тиском	16,0 %	14,7 %	7,0 %	5,6 %
Деформування	12,4 %	8,8 %	50,0 %	13,9 %

В таблиці 3 і таблиці 4 наведені значення коефіцієнтів a та b в залежностях $R_\epsilon(\epsilon) = a \cdot \epsilon^{-b}$ та $R_\epsilon(N) = a \cdot N^{-b}$ для різних видів навантаження.

Таблиця 3

Коефіцієнти a та b в залежності $R_\epsilon(\epsilon) = a \cdot \epsilon^{-b}$

Вид експерименту	Стабілізація опору після навантаження					
	(провідник – ТРГ)				(провідник – шунгіт)	
Вид навантаження	Стискування		Розтяг		Стискування	Розтяг
Тип підкладки	Шкіра	Гума	Шкіра	Гума	Гума	Гума
a	70,41	162,48	1140,00	984,41	3223,0	17740,0
b	0,0110	0,0160	0,00617	0,0070	0,014	0,024
Коеф. кореляції	0,9980	0,9880	0,9997	0,9997	0,994	0,994

Таблиця 4

Коефіцієнти a та b в залежності $R_\epsilon(N) = N \cdot \epsilon^{-b}$

Вид експерименту	Циклічне навантаження					
	(провідник – ТРГ)				(провідник – шунгіт)	
Вид навантаження	Стискування		Розтяг		Стискування	Розтяг
Тип підкладки	Шкіра	Гума	Шкіра	Гума	Гума	Гума
a	227,12	658,60	1420,00	1030,00	1820	38037,00
b	0,0610	0,0380	0,0260	0,0150	0,025	0,112
Коеф. кореляції	0,9992	0,9994	0,9961	0,9993	0,991	0,980

З таблиць 3 і 4 видно, що криві стабілізації та циклічного навантаження при стискуванні для ТРГ-гума мають більш вигнуту форму. Різницю коефіцієнтів a для різного виду підкладок можна пояснити різною пропорцією провідникової та діелектричної компоненти в суміші, що викликано різним вибором клею, який виступає діелектриком, різними типами підкладки.

На рис. 4 наведені залежності опору від циклічних деформацій ($f = 1 \text{ c}^{-1}$). Показано, що коефіцієнт підсилення для датчиків з шунгітовою електропровідною компонентою на початку досліду в 15,5 разів більше, ніж при наявності як електропровідної компоненти ТРГ, і складає 17,5, незважаючи на однакові умови виготовлення. Але коефіцієнт підсилення в першому випадку поводить себе нестабільно – зменшується з часом.

На рис. 5 наведені залежності опору ПФД від ступеня навантаження. З графіків видно, що ПФД як з шунгітовою електропровідною компонентою, так і з графітовою (графітовий порошок) збільшують опір при навантаженні тиском на відміну від ПФД з ТРГ електропровідною компонентою. Це можна пояснити проявом ефекту "сіпа" в системах з ТРГ, адже ТРГ легко пресується, що призводить до поліпшення провідності і збільшення концентрації графіту на одиницю площі. На відміну від ТРГ тверді порошкоподібний графіт і шунгіт не мають цієї властивості. При пресуванні частинки даних компонентів зрушуються, і частково їхнє місце займає діелектрична складова, що призводить до зменшення площі контакту і, як наслідок, до збільшення опору суміші.

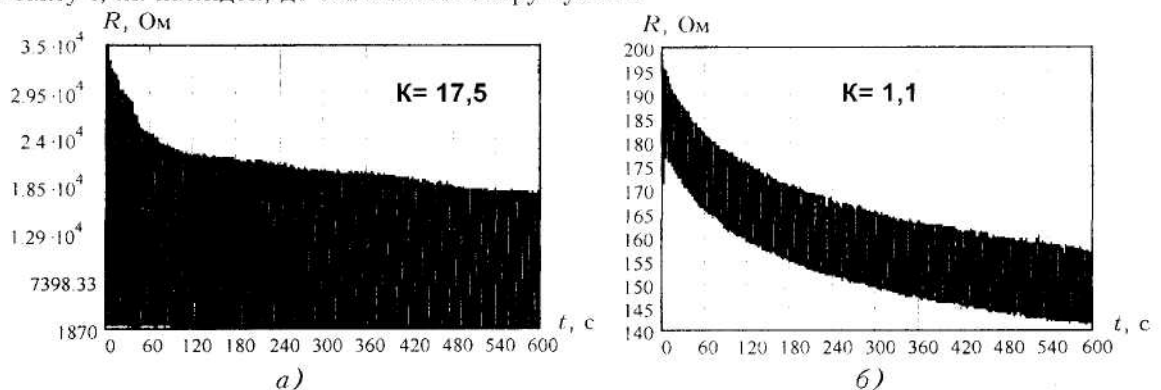


Рис. 4. Залежність опору від циклічних деформацій для ПФД на гумовій підкладці:
 а) для шунгітової електропровідної компоненти;
 б) для ТРГ електропровідної компоненти

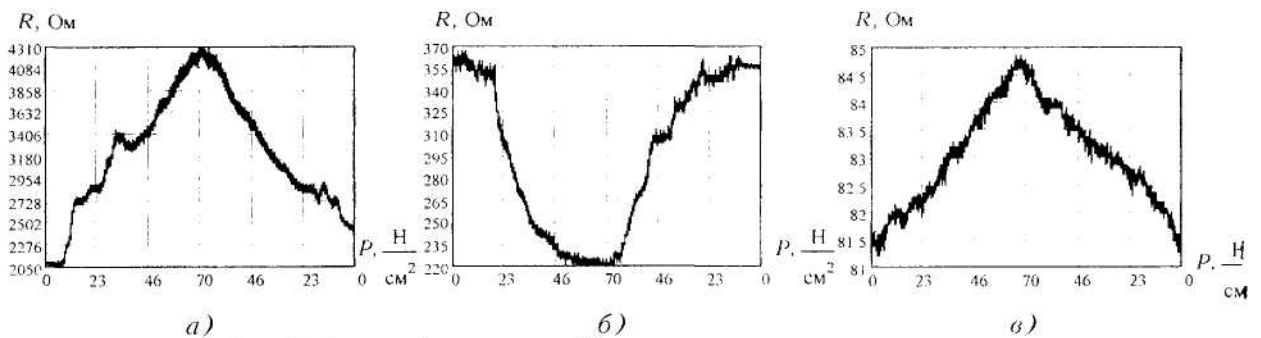


Рис. 5. Залежність опору від ступеня навантаження тиском (максимальне зусилля 70 Н/см^2):
 а) для шунгітової електропровідної компоненти;
 б) для ТРГ електропровідної компоненти;
 в) для графітової електропровідної компоненти

Вищевикладене дозволяє стверджувати, що при повздовжніх деформаціях зменшення провідності провідникової компоненти збільшує коефіцієнт підсилення датчика, але при цьому при циклічних навантаженнях з часом він зменшується за законом $R(\epsilon) = a \cdot \epsilon^{-b}$ і навпаки. Зменшення ж густини провідникової компоненти (ТРГ) призводить до зовсім протилежних характеристик стискування (рис. 5). Результати експериментів доводять, що зазначені явища потребують більш детального дослідження. Да даному етапі досліджень зі значною долею впевненості ми можемо казати про можливість побудови математичної моделі поведінки

реальних перколяційно-фрактальних систем, оскільки всі процеси в системах підкоряються певним законам. І ми впевнені, що перколяційні і перколяційно-фрактальні системи знайдуть набагато ширше застосування в науці та техніці в найближчому майбутньому.

Висновки

1. Використання як електропровідникової компоненти шунгіту і графіту (дрібнофракційної фракції) дало змогу з'ясувати залежність коефіцієнта підсилення від ступеня провідності і від густини матеріалу провідникової компоненти, порівняти ПФД з різними, придатними для їх конструювання матеріалами.

2. Проведена оцінка стабілізації опору після навантаження розтягом та стискуванням перколяційно-фрактальних середовищ. Знайдені значні відмінності між властивостями ПФД при використанні різних електропровідних компонент, таких як графіт, шунгіт, ТРГ.

3. Проведені дослідження і оцінені результати впливу циклічного стискування на зазначені перколяційно-фрактальні системи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах. – М.: Мир, 1985. – 419 с.
2. Писаренко Г.С., Стрижало В.А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
3. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. – М.: Мир, 1990. – Т. 2. – 400 с.
4. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – San Francisco: Freeman, 1982.
5. Olemskoi A.I. Fractal in condensed matter Physics // Phys. Rev. – 1995. – Vol. 18. – P. 1–173.
6. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
7. Черныш И.Г., Карпов И.И. Физико-химические свойства графита и его соединений. – АН УССР. Ин-т химии поверхности. – Киев: Наук. думка, 1990. – 200 с.
8. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 296 с.
9. Грабар І.Г. Самоподібність в закономірностях жорсткості та пружності фрактальних та фрактально-перколяційних систем // Вісник ЖІТІ. – 1996. – № 3. – С. 38–44.
10. Грабар І.Г. Перколяційно-фрактальні матеріали – надперспективні матеріали для тензометричних датчиків-перетворювачів // Вісник ЖІТІ. – 1997. – № 6. – С. 3–7.
11. Грабар І.Г., Грабар О.І. Теоретико-ймовірнісне моделювання механічних властивостей деформованих перколяційних середовищ // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 15. – С. 3–7.
12. Грабар І.Г., Кубрак Ю.О. Явище термостабілізації в перколяційно-фрактальних системах гума-графіт // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 4–6 вересня 2001 року, ЖІТІ. – С. 83–87.
13. Грабар І.Г., Кубрак Ю.О. Дослідження деформованих перколяційно-фрактальних систем струмом високої частоти // Вісник ЖІТІ / Спеціальний випуск. – 2002. – С. 63–68.
14. Патент України № 39401А від 15.06.2001 р., Бюл. № 5.

ГРАБАР Іван Григорович – доктор технічних наук, професор, перший проректор, проректор з наукової роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- нелінійні явища та моделі;
- синергетика;
- нові технології, екологія.

КУБРАК Юрій Олександрович – аспірант кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- перколяційні процеси;
- синергетика.