

- мінімізація використання в промисловості і агросекторі токсичних хімічних реагентів;
- інформаційної оцінки параметрів потоків даних про стан об'єктів техногенної і екологічної системи та їх ситуаційна інтерпретація;
- визначення компонентного складу і концентрації хімічних елементів в екологічному середовищі і викидах промисловості та енергетиці шкідливих речовин у воду і повітря;
- розроблення методів ефективного управління моніторингом за джерелами забруднень на підставі сучасних інформаційних технологій, інтелектуальних методів обробки, інтерпретації та представлення даних з використанням в каналах ІВС сенсорів на нових фізичних принципах.

Висновки. Розглянуто інформаційні аспекти побудови систем моніторингу регіональних і техногенних структур та їх навколишнього середовища і проблеми забезпечення ефективного управління.

1. *Беспамятков Г.П.* Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. / Г.П. Беспамятков, Ю.А. Кротов.// -Л. Химия1985.- 528с.
2. *Сікора Л.С.* Сучасні тенденції інтелектуалізації процесу управління в ієрархічних системах в умовах загроз./ Л.С. Сікора, Н.К. Лиса, Я.П. Драган, Б.І. Яворський. // ЗНП, Комп'ютерні технології друкарства. - УАД, 2016. – Вип.2(36).- С.8-24.
3. *Сікора Л.С.* Системологія прийняття рішень на управління в складних технологічних структурах. // Л.С. Сікора. – Львів: Каменяр, 1998.-453с.

Поступила 16.10.2017р.

УДК 531.43+539.3/612+62-4

И.К. Валеева, Б.А. Галанов, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ТЕЛ

Abstract. Model of adhesive contact between rough elastic bodies is under consideration. Roughness is simulated by the Winkler-Fuss nonlinear elastic layer. The contact of solids is described by the nonlinear boundary integral equations, solutions of which determine contact characteristic the reduction of effective thickness of rough layer, contact stresses, nominal contact area, real contact area.

Введение

Модель чисто упругого контакта шероховатых тел впервые была разработана Журавлевым В.А. [1]. Он рассмотрел модель множественного контакта с неровностями в виде сферических сегментов одинакового радиуса

при линейном законе распределения высот неровностей. Гринвуд и Вильямсон [2] улучшили модель Журавлева, предполагая гауссовское распределение высот неровностей.

Контактные модели шероховатых упругих тел, где шероховатость моделируется слоем Винклера-Фусса, были развиты в работах Штаермана И.Я., Попова Г.Я., Александрова В.М. и Мхитаряна С.М., Крагельского И.В. и Добычина М.Н., Галина Л.А., Горячевой И.Г., Галанова Б.А., Бородича Ф.М. и Мосолова А.Б. и др.

Модели контакта упругих сфер с адгезией были впервые предложены независимо Джонсоном, Кендалом, Робертсом [3] в 1971 году и Дерягиным Б.В., Муллером В.М. и Топоровым Ю.П. [4] в 1975 году.

Первые модели контакта номинально плоских шероховатых упругих тел с адгезией были разработаны Джонсоном [5], Фуллер и Тейбором [6]. Предполагая один и тот же радиус кривизны для всех неровностей, Джонсон [5, 7, 8] решил контактную задачу для экспоненциального распределения высот неровностей, а Фуллер и Тейбор [6, 8] – для гауссовского распределения.

Исследования, посвященные адгезионному взаимодействию шероховатых упругих тел с произвольной номинальной геометрией, представлены в работах [8 – 12].

В работе предлагается модель адгезионного контакта шероховатых упругих тел, позволяющая анализировать контакт тел с различной номинальной геометрией. Шероховатость моделируется нелинейным слоем Винклера-Фусса. Механические свойства этого слоя определяются статистическими теориями адгезии номинально плоских шероховатых поверхностей, которые развиты в работах Гринвуда, Вильямсона, Фуллер, Тейбора, Джонсона, Можи. Контакт тел моделируется нелинейными граничными интегральными уравнениями Гаммерштейна с немонотонными операторами, решения которых определяют уменьшение эффективной толщины шероховатого слоя, контактные напряжения, номинальную и реальную площадь контакта, зависимость приложенной силы P от сближения тел δ , силу адгезии.

Граничные интегральные уравнения контактной задачи для шероховатых упругих тел при наличии адгезии

Хорошо известно [5, 7, 8], что контакт двух упругих полупространств, ограниченных номинально плоскими шероховатыми поверхностями, может быть заменен, без ограничения общности, контактом жесткой плоской поверхности и упругого полупространства, которое ограничено некоторой условной шероховатой плоскостью, и имеет приведенный модуль

$$E^* = \left((1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2 \right)^{-1},$$

где E_1 , E_2 и ν_1 , ν_2 – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов шероховатых контактирующих тел, соответственно.

Схема контакта гладкого жесткого тела с шероховатым упругим полупространством $x_3 \geq 0$ показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: P – сила, вдавливающая тело в полупространство; δ – сближение контактирующих тел (глубина индентирования); f – зазор между телом и условной границей адгезионного взаимодействия $x_3=0$ перед деформацией; W – нормальное (в направлении оси x_3) упругое перемещение границы полупространства $x_3=0$, вызванное силой P ; S – номинальная область контакта; t_g – условная геометрическая полутолщина шероховатого слоя; t_a – расстояние между условной границей адгезионного взаимодействия и осью x , $t_a \geq t_g$ (при $d \geq t_a$ взаимодействием контактирующих (условных) тел можно пренебречь, величина t_a зависит от отношения δ_c/σ [8]). Если адгезии нет, то $t_a = t_g$; Δ – уменьшение (обжатие) шероховатого слоя после деформации, $\Delta \geq 0$ (на рис. 1 величина $(-\Delta)$ является перемещением гладкой плоскости из положения $z=t_a$). Перемещение W определяется формулой [8, 13, 14]

$$W(\mathbf{x}) = \theta \int_S K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) p(\mathbf{y}) d\mathbf{y}; \quad \theta = (\pi E^*)^{-1}; \quad \mathbf{y} = (y_1, y_2) \in S,$$

где $K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left[(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 \right]^{-1/2}$.

Контактная задача может быть сведена к исследованию одного уравнения типа Гаммерштейна [13] с параметром δ

$$u(\mathbf{x}) + \theta \int_{\Omega} K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) p(u(\mathbf{y})) d\mathbf{y} = \delta - f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2), \quad \mathbf{y} = (y_1, y_2) \in \Omega, \quad (1)$$

где $u(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \Omega$, – единственная неизвестная функция, Ω – произвольная область, которая содержит номинальную область контакта S .

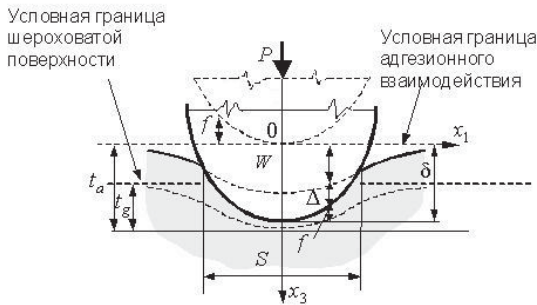


Рис. 1. Схема гладкого контакта жесткого тела с шероховатым упругим полупространством

Предполагается, что все условные неровности имеют одинаковый (эффективный) радиус кривизны R и равномерно распределены в плоскости

$z=0$ с плотностью η_s . $R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1}$ – радиус кривизны условных неровностей [7] (R_1 и R_2 – радиусы кривизны неровностей границ исходных упругих полупространств); $w = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$ – удельная работа адгезии. Функция $\varphi_s(z) = \exp(-z^2/2\sigma^2)$ является плотностью вероятности для гауссовского распределения высот вершин неровностей со стандартным отклонением $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ (rms). Здесь σ_1, σ_2 – стандартные отклонения высот неровностей шероховатых границ исходных полупространств, имеющих гауссовские распределения.

Тогда, в соответствии с [5, 6, 8] номинальное контактное давление между номинально плоскими шероховатыми поверхностями представляется в виде

$$p_f(d) = \frac{\eta_s P_c}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{d-\delta_p}^{\infty} g\left(\frac{\delta}{\delta_c}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz = \eta_s P_c p^*, \quad (2)$$

$$\delta = z - d$$

где $p^* = p/(\eta_s P_c)$ – безразмерное номинальное контактное давление, функциональная зависимость $P_i/P_c = g(\delta_i/\delta_c)$ для отдельной неровности определяется адгезионными теориями гладких упругих тел [8], δ_p – абсолютная величина минимального перемещения неровности: $\delta_p = \delta_c$ в JKR (Johnson-Kendall-Roberts) [3, 8] теории контакта, $\delta_p = 0$ в DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) теории [4, 8]. Величины P_c и δ_c принимаются как характерные масштабы при малых нагрузках P и сближениях δ контактирующих пар. Эти масштабы могут быть выбраны произвольно, используя определяющие параметры E^* , w и R . Принятые здесь величины имеют простой механический смысл в JKR теории: P_c и δ_c являются точными абсолютными величинами силы отрыва и минимальной величины перемещения, соответственно [8]

$$P_c = 1,5\pi w R, \quad \delta_c = 3/4 \left((\pi^2 w^2 R) / (E^{*2}) \right)^{1/3}.$$

Если для отдельной неровности нормированная площадь контакта определяется на основе теории адгезионного контакта гладких упругих тел $S_i/(R\delta_c) = f_s(\delta_i/\delta_c)$, тогда при контакте номинально плоских шероховатых поверхностей с гауссовским распределением высот неровностей с радиусом R фактическая площадь может быть представлена в виде

$$S_r(d) = \frac{NR\delta_c}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{d-\delta_p}^{\infty} f_s\left(\frac{\delta_i}{\delta_c}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz,$$

а отношение фактической площади контакта к номинальной

$$s_f = S_r/S = \frac{\eta_s R \delta_c}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{d-\delta_p}^{\infty} f_s\left(\frac{\delta_i}{\delta_c}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz = \eta_s R \delta_c s^*. \quad (3)$$

Зависимости, связывающие радиус контакта a_i со сближением δ_i для гладких упругих тел для теорий контакта DMT, JKR и промежуточной теории Можи приведены в работе [8].

Аналогично тому, как определяется контактное давление $p=P/S$, для номинально плоских шероховатых поверхностей твердых тел, может быть определено отношение фактической площади контакта к номинальной $s=S_r/S$,

$$\int_S p(\mathbf{x})d\mathbf{x} = P, \quad \int_S s(\mathbf{x})d\mathbf{x} = S_r,$$

где

$$p = p(\Delta) \equiv \begin{cases} p_f(d), & \Delta > 0 \\ 0, & \Delta \leq 0 \end{cases}, \quad d = t_a - \Delta, \quad s = s(\Delta) \equiv \begin{cases} s_f(d), & \Delta > 0 \\ 0, & \Delta \leq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Для номинально плоских шероховатых плит графики нормированной силы (или нормированного контактного давления) $p^* = P/(NP_c)$ как функции нормированного расстояния $d^* = d/\sigma$ представлены для различных значений параметра $\delta_c/\sigma = \delta_c^*$ в [8]. При этом контактное давление может быть не только положительным, но и отрицательным, что означает наличие растягивающих напряжений в области контакта, обусловленных адгезией. Для номинально плоских шероховатых плит могут быть также построены графики, связывающие отношение s_f (3) с контактным давлением p_f (2) для разных значений параметра $\delta_c^* = 0,3; 0,6; 1$. Для JKR теории контакта неровностей эти графики представлены на рис. 2. Фактическая площадь контакта зависит от параметра шероховатости δ_c^* и растет с ростом этого параметра.

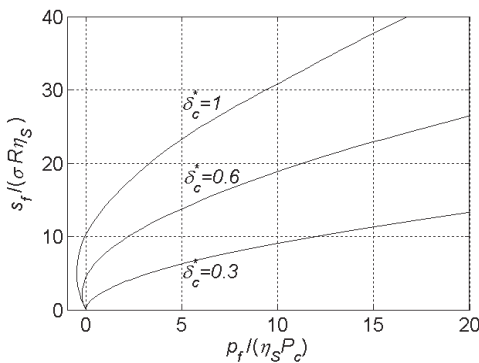


Рис. 2. Связь контактных характеристик s_f и p_f для номинально плоских шероховатых поверхностей для JKR теории контакта неровностей

Безразмерная формулировка контактной задачи

Рассматривается случай, когда $f(\mathbf{x}) = A|\mathbf{x}|^k, k \geq 1$. В безразмерных величинах $\mathbf{x}_0 = (x_{01}, x_{02}), \mathbf{y}_0 = (y_{01}, y_{02}), U, \delta_0, p_0, \Omega_0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 &= (A/\delta)^{1/k} \mathbf{x}; \quad \mathbf{y}_0 = (A/\delta)^{1/k} \mathbf{y}; \quad U(\mathbf{x}_0) = u(\mathbf{x}_0 (\delta/A)^{1/k}) \delta^{-1}; \quad \delta_0 = \delta/\delta_c; \\ p_0(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) &= \theta \delta_c^{(1-k)/k} A^{-1/k} p(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) = \kappa p^*(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)); \\ s_0(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) &= \theta \delta_c^{(1-k)/k} A^{-1/k} s(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) = \theta \delta_c^{(1-k)/k} A^{-1/k} \sigma R \eta_s \delta_c^* s^*(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) \\ \kappa &= \theta \delta_c^{(1-k)/k} A^{-1/k} \eta_s P_c \end{aligned}$$

уравнение скользящего контакта (1) принимает вид:

$$U(\mathbf{x}_0) + \delta_0^{(1-k)/k} \int_{\Omega_0} K(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0) p_0(\delta_0 U(\mathbf{y}_0)) d\mathbf{y}_0 = 1 - |\mathbf{x}_0|^k; \quad \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0 \in \Omega_0 \quad (5),$$

где $U(\mathbf{x}_0), \mathbf{x}_0 \in \Omega_0$ – неизвестная безразмерная функция, зависящая от безразмерных параметров δ_0, κ ; $\Omega_0 = (|x_{01}| \leq 1 + \varepsilon; |x_{02}| \leq 1 + \varepsilon)$, и число $\varepsilon > 0$ выбирается так, чтобы выполнялось включение $S_0 = \{\mathbf{x}_0 : U(\mathbf{x}_0) > 0\} \subseteq \Omega_0$, где S_0 – безразмерная область контакта; функция $p^*(\cdot)$ определяется формулой (2).

Для дискретизации уравнения (5) применяется метод колокации, и дискретное уравнение решается модифицированным методом Ньютона, аналогично [13].

Зная решение $U(\mathbf{x}_0), \mathbf{x}_0 \in \Omega_0$ уравнения (5) можно получить все характеристики скользящего контакта тел: уменьшение эффективной толщины шероховатого слоя $\Delta(\mathbf{x})$, контактное давление $p(\mathbf{x})$, область контакта S , зависимость приложенной силы P от сближения тел δ , силу адгезии.

Сила P , приложенная к телам, представляется в виде [14]

$$P = \pi E^* \delta_c^{(1+k)/k} A^{-1/k} P_0; \quad P_0 = \delta_0^{2/k} \int_{\Omega_0} p_0(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) d\mathbf{x}_0, \quad (6)$$

Фактическая площадь контакта определяется

$$S_r = \int_{\Omega} s(u(\mathbf{x})) d\mathbf{x} = R \eta_s \delta_c^{(k+2)/k} A^{-2/k} S_{r0}, \quad S_{r0} = \delta_0^{2/k} \int_{\Omega_0} s_0(\delta_0 U(\mathbf{x}_0)) d\mathbf{x}_0. \quad (7)$$

Переход к размерным величинам осуществляется по формуле

$$S_r = \left(\frac{\delta_c}{A} \right)^{2/k} \sigma R \eta_s \delta_c^* S_{r0}$$

Результаты расчета и их анализ

Анализируется случай скользящего контакта шероховатой сферы номинального радиуса R_S и шероховатого полупространства (т.е. $k=2, A=1/(2R_S)$) для безразмерного параметра $\kappa=8.93 \cdot 10^{-2}$, приведенный в работах [13, 14]. Механические свойства слоя Винклера-Фусса описываются функцией (2), (4), где $g(\delta_i/\delta_c)$ определяется исходя из выбранной теории контакта отдельных неровностей. Полагаем, что контакт неровностей происходит в соответствии с JKR теорией контакта [3]. Тогда функциональная зависимость $P_i/P_c = g(\delta_i/\delta_c)$ в (2) определяется JKR теорией адгезии гладких упругих тел. В этом случае функция g является обратной к многозначной функции $\delta_i/\delta_c = G(P_i/P_c)$, которая задается формулами [8]:

$$\frac{\delta_i}{\delta_c} = (3\chi - 1) \left(\frac{1 + \chi}{9} \right)^{1/3}, \quad \chi = \sqrt{1 + \frac{P_i}{P_c}}, \quad \chi \geq 0 \quad \text{для } \delta_i/\delta_c \geq -3^{-2/3},$$

$$\frac{\delta_i}{\delta_c} = -(3\chi + 1) \left(\frac{1 - \chi}{9} \right)^{1/3}, \quad 0 \leq \chi \leq \frac{2}{3} \quad \text{для } -1 \leq \delta_i/\delta_c \leq -3^{-2/3}.$$

Графики функций $p^*(\Delta_0)$, где $\Delta_0 = \delta_0 U(\mathbf{x}_0)$ для JKR, DMT теорий контакта отдельных неровностей и промежуточной теории Можы для разных параметров шероховатости $\delta_c^* = \delta_c/\sigma$ и соответствующих величин $t_a^* = t_a/\sigma$ представлены в работе [14].

Придавая величине δ_0 разные значения, численно строятся функциональные зависимости (6), (7). По результатам вычислений получены зависимости $P_0(\delta_0)$, $S_{r0}(\delta_0)$ и $P_0(S_{r0})$, при разных $\delta_c^* = \delta_c/\sigma = 0.3, 0.6, 1$ (рис. 3а – 3в). Здесь $t_a^* = t_a/\sigma$ – нормированное расстояние между границей адгезионного взаимодействия тел и границей упругого полупространства до его деформации. При наличии адгезии зависимости $P_0(\delta_0)$ – немонотонные. Отрицательные величины нагрузки при малых сближениях являются следствием адгезии. На зависимости безразмерной фактической площади контакта S_{r0} от безразмерного сближения δ_0 существенным образом влияет параметр шероховатости δ_c^* при заданном параметре κ . При малых сближениях δ_0 фактическая площадь контакта имеет нелинейную зависимость от нагрузки.

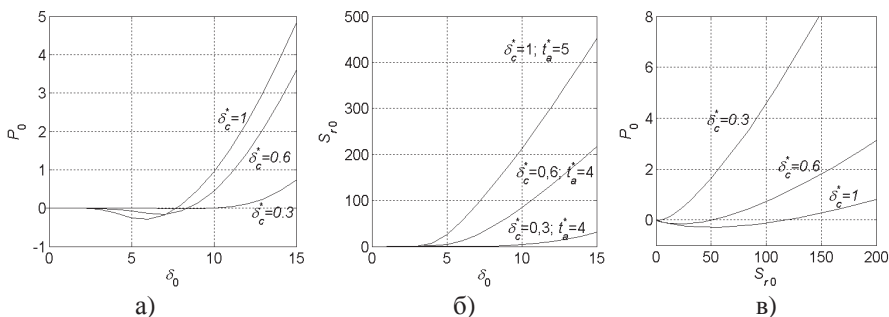


Рис. 3. Зависимости $P_0(\delta_0)$ (а), $S_{r0}(\delta_0)$ (б), $P_0(S_{r0})$ (в) при разных величинах δ_c^*

Выводы

Адгезионные контакты представляют большой интерес во многих инженерных приложениях. Проводить исследование таких контактов можно с помощью предложенных моделей, когда контакт тел моделируется нелинейными граничными интегральными уравнениями. Это позволяет численно моделировать контакты в широком диапазоне изменения материалов контактных пар и моделей адгезионного взаимодействия, предоставлять рекомендации относительно обработки поверхностей и выбора контактирующих материалов, наиболее целесообразных для эффективной эксплуатации.

Разработанные модели позволяют определять для шершавых номинально искривленных поверхностей с произвольной геометрией номинальную и фактическую площадь контакта, нормальные и касательные напряжения в области контакта, в том числе при отрицательном (адгезионном) номинальном контактном давлении. На адгезию контактирующих тел существенно влияют не только свойства материалов, но и микро-геометрические параметры шероховатости, вместе с макро-геометрическими параметрами тел.

1. Журавлев В.А. К вопросу теоретического обоснования закона Кулона для несмазанных поверхностей // Журнал техн. физики. – 1940. – 10, №17. – С.1447-1452.
2. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1966. – 295. – P.300-319.
3. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the Contact of Elastic Solids // Proc. R. Soc.– 1971. – A324. – P.301-313.
4. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // J. Colloid Interface Science. – 1975. – 53, No 2. – P. 314-326.
5. Johnson K.L. Non-Hertzian contact of elastic bodies. In: The mechanics of the contact between deformable bodies, ed. by de Pater, Kalker. – Delft:University Press, 1975. – P.26-40.

6. Fuller K.N.G., Tabor D. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1975. – **345**. – P.327-342.
7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Наука, 1989. – 510с.
8. Maugis D. Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solids. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 414p.
9. Rabinovich Y.I., Adler J.J., Ata A., Singh R.K., Moudgil B.M. Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. I. Role of Asperity Geometry // J. Colloid Interface Science. – 2000. – **232**. – P.10-16.
10. Rabinovich Y.I., Adler J.J., Ata A., Singh R.K., Moudgil B.M. Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. II. Measurement and Comparison with Theory // J. Colloid Interface Science. – 2000. – **232**. – P.17-24.
11. Gotzinger M., Peukert W. Particle Adhesion Force Distributions on Rough Surfaces // Langmuir. – 2004. – **20**. – P.5298-5303.
12. Li Q., Rudolph V., Peukert W. London-van der Waals adhesiveness of rough particles // Powder Technology. – 2006. – **161**. – P.248-255.
13. Galanov B.A. Models of adhesive contact between rough elastic bodies. Int. J. Mech. Sci. 53. (2011) 968–977.
14. B.A. Galanov, I. K. Valeeva. Sliding Adhesive Contact of Elastic Solids with Stochastic Roughness // International Journal of Engineering Science 101 (2016) 64.

Поступила 23.10.2017 р.

УДК 009.4

Б.М. Гавриш¹, к.т.н., ст. викл, УАД, О.В. Тимченко^{1, 2}, д.т.н., професор,
О.О. Тимченко¹, аспірант

МЕТОДИ НЕЧІТКОГО ОПРАЦЮВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕГМЕНТАЦІЇ

Анотація. Розглядаються методи поліпшення якості зображень шляхом лінійної та нелінійної фільтрації та подальшого нечіткого опрацювання бінарних зображень для їх розпізнавання.

Ключові слова: нечітке опрацювання зображень, нейронні мережі.

Abstract. The methods of improving image quality through linear and nonlinear filtration and further fuzzy processing of binary images for their recognition are considered.

Keywords: fuzzy image processing, neural networks.

¹, Українська академія друкарства

² Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie