

УДК 621.383.4

Н. В. ДЕЙНЕКО

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CdS/CdTe

Приведены результаты исследований влияния уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe с тыльными контактами, изготовленными согласно различным вариантам конструктивно-технологического решения. На основании полученных результатов выходных параметров и световых диодных характеристик обоснован выбор оптимального конструктивно-технологического решения тыльных контактов к солнечным элементам на основе CdS/CdTe. Показано, что использование нанослоя Cu позволяет получить деградационно-стойкие солнечные элементы, которые демонстрируют максимальную эффективность при уровне освещенности характерной для Харьковской области.

Ключевые слова: пленочный солнечный элемент, гетероструктура, теллурид кадмия, выходные параметры, тыльный контакт

Наведено результати досліджень впливу рівня освітленості на вихідні параметри сонячних елементів на основі CdS / CdTe з тильними контактами, виготовленими згідно з різними варіантами конструктивно-технологічного рішення. На підставі отриманих результатів вихідних параметрів і світлових діодних характеристик обґрунтовано вибір оптимального конструктивно-технологічного рішення тильних контактів до сонячних елементів на основі CdS / CdTe. Показано, що використання наносару Cu дозволяє отримати деградаційно-стійкі сонячні елементи, які демонструють максимальну ефективність при рівні освітленості що характерна для Харківської області.

Ключові слова: плівковий сонячний елемент, гетероструктура, телурид кадмію, вихідні параметри, тильний контакт

The paper discusses issues related to the study of the effect of light levels on the efficiency of solar cells based on CdS / CdTe with the back contacts that contain Cu and which are made without Cu layer.

The result of the study have output parameters and light-diode characteristics of solar cells ITO / CdS / CdTe / Cu / Au and ITO / CdS / CdTe / Au at different light levels.

For the first time it found that the absence of the copper layer on the back surface efficiency ITO / CdS / CdTe / Cu / Au film solar cell is limited to a level of 3–4 %. In forming the low-resistance tunnel junction Cu / Au efficiency of solar cells based on ITO / CdS / CdTe increases to 10.4 %. Maximum efficiency of laboratory samples of solar cells is fixed at the power of solar radiation of 70 mW / cm², which corresponds to the power of solar radiation, which is typical for the area of Kharkiv region.

Developed construction and technological solutions of solar cells ITO / CdS / CdTe / Cu / Au, which allow to receive lab samples with an efficiency of over 10 %.

Keywords: film solar cell, heterostructure, cadmium telluride, the output parameters, the back contact

Введение. Пленочные солнечные элементы (далее – СЭ) на основе теллурида кадмия являются перспективными для широкомасштабного промышленного производства. Однако доля выпускаемых СЭ на основе CdTe не превышает 26 %, производятся в промышленных масштабах всего несколькими зарубежными компаниями. Ограничение промышленного выпуска таких СЭ, несмотря на высокую технологичность методов получения пленок сульфида и теллурида кадмия, обусловлено физико-технологическими проблемами формирования тыльных контактов к базовым слоям теллурида кадмия р-типа электропроводности.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Одним из современных направлений повышения эффективности пленочных СЭ на основе CdS / CdTe является увеличение фактора заполнения световой ВАХ путем снижения последовательного сопротивления СЭ при оптимизации конструктивно-технологического решения тыльных контактов [1, 2]. Использование омического контакта к базовым слоям р-CdTe в условиях промышленного производства не является экономичным, поскольку только платина имеет необходимую для формирования омического перехода работу выхода электронов [3]. Поэтому к слоям р-CdTe традиционно формируют туннельные контакты, используя при этом тонкие пленки, содержащие медь или халькогенид меди [4]. Однако диффузия меди в базовый слой приводит к деградации выходных параметров пленочных СЭ на основе CdS/CdTe [5–7]. Поэтому в настоящее время ведутся

интенсивные исследования по разработке тыльных контактов, которые медь не содержат. Однако, как правило, применение таких контактов не позволяет формировать высокоэффективные СЭ.

Наряду с теоретической моделью, описывающей тыльные контакты к CdTe в рамках идеального туннельного диода, разработаны и нашли свое экспериментальное подтверждение модели обращенного и сквозного диода [8, 9].

Однако, несмотря на успехи в построения физических моделей оптимальных тыльных контактов к базовым слоям теллурида кадмия, комплексные работы их экспериментальной апробации, за редким исключением, не проводятся.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является определение влияния уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe с тыльными контактами, изготовленными согласно различным вариантам конструктивно-технологического решения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

– провести анализ выходных параметров и световых диодных характеристик солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au и ITO/CdS/CdTe/Au при различных уровнях освещенности;

– установить, влияние прослойки меди, на тыльной поверхности пленочных солнечных элементов, и уровня освещенности на эффективность работы приборной структуры.

© Н. В. Дейнеко, 2016

Матеріали і методи дослідження. Базові пліночні гетеросистеми CdS/CdTe осаждалися методом термічного вакуумного випарення в єдиному технологічному циклі. пліночну гетероструктуру Cu/Au нанорозмірної товщини, також здійснювалось цим методом. Нанесення тильних контактів плінок ІТО (оксидів індія і олова) здійснювалось методом нерективного магнетронного розпилення на постійному тоці з використанням оригінального матеріалосберегаючого магнетрона. Перед нанесенням тильних контактів поверхню теллурида кадмія травилась в 5 % розчині брома в метанолі на протязі 10 секунд. Завдяки методу термічної конденсації без нагріву підложки на поверхню базового шару наносилися шари міді товщиною 12 нм і плівка золота товщиною 50 нм. Після цього здійснювався отжиг на повітрі при температурі 200 °C на протязі 30 хвилин. При цьому в течение передшляхуючих 10 хвилин лабораторний зразок нагрівался до вказаної температури отжигу. Крім лабораторних зразків зі стандартними технологічними операціями при формуванні тильних контактів аналізувались СЗ, в конструкції тильних контактів яких прошлойка міді відсутствовала, і які після отримання пліночної гетеросистеми Cu/Au не отжигались.

Для дослідження впливу нанорозмірної прошлойки міді в конструкції тильного контакту на ефективність фотоелектричних процесів в пліночних СЗ ІТО/CdS/CdTe були виміряні світлові

вольт-амперні характеристики (далі – ВАХ) з подальшою їх аналітичною обробкою з використанням комп'ютерного моделювання. Для вимірювання компенсаційним методом в стаціонарному режимі облучення, приблизному до стандартному AM1,5, світлових ВАХ зразків СЗ з площею фотоприймальної поверхні до 2 см², універсальний світлодіодний освітлювач УСО-2 [10], який був вмонтований в лабораторну установку.

Вимірювання проводилися для серії зразків з різними конструктивними рішеннями тильного контакту при потужностях освітлення від 10 мВт/см² до 100 мВт/см² (100 мВт/см² відповідає стандартному режиму освітлення AM1).

Обговорення результатів досліджень. Путем аналітичної обробки світлових ВАХ з використанням комп'ютерного моделювання, були визначені вихідні параметри і світлові діодні характеристики для кожного режиму освітлення представлені в таблицях 1 і 2.

Було встановлено, що ефективність СЗ при потужності освітлення 1000 Вт/м² з тильним контактом Cu/Au більше 10 %, а з тильним контактом Au – 3,1 %, що обумовлено, в першу чергу, великим значенням напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової ВАХ.

Залежність густоти току короткого замикання від рівня освітлення для обох типів контактів носить традиційний лінійний характер (рис. 1, а).

Таблиця 1 – Вплив рівня освітлення на вихідні параметри і світлові діодні характеристики ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

Параметри і характеристики	P _c , мВт/см ²									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
J _{кз} , мА/см ²	1,9	3,8	5,94	8,3	10,3	12,8	15,0	17,0	19,5	21,2
V _{хх} , мВ	697	711	719	720	728	727	729	731	727	731
FF, от. ед.	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,663	0,66	0,66	0,66	0,66
КПД, %	8,7	9,1	9,49	10	10	10,29	10,37	10,23	10,36	10,19
J _ф , мА/см ²	1,87	3,8	5,95	8,4	10,3	12,8	15,1	17,0	19,5	21,3
R _п , Ом·см ²	<1	<1	<1	<1	<1	1,3	1,3	1,4	1,6	1,6
R _ш , Ом·см ²	8250	4420	2390	2400	1280	1010	894	741	694	623
A, от. ед.	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5
J ₀ , 10 ⁻⁷ А/см ²	1,3	2,2	2,7	2,7	2,6	2,2	2,6	2,1	1,8	1,9

Таблиця 2 – Вплив рівня освітлення на вихідні параметри і світлові діодні характеристики ІТО/CdS/CdTe/Au

Параметри і характеристики	P _c , мВт/см ²									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
J _{кз} , мА/см ²	1,5	3,2	5,0	6,8	8,7	10,7	12,5	14,3	16,1	18,2
V _{хх} , мВ	351	361	367	370	373	375	376	377	379	380
FF, от. ед.	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45
КПД, %	2,6	2,8	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1
R _п , Ом·см ²	24,8	13,6	9,81	8,23	6,93	6,14	5,52	5,16	4,92	4,74
J _ф , мА/см ²	1,6	3,2	5,1	6,9	8,9	10,8	12,7	14,5	16,3	18,4
R _ш , Ом·см ²	4·10 ⁴	3·10 ⁶	6·10 ⁶	2·10 ⁵	3·10 ⁶	3·10 ⁵	6·10 ⁵	1·10 ⁷	8·10 ⁵	4·10 ⁷
A, от. ед.	2,6	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
J ₀ , 10 ⁻⁵ А/см ²	0,9	1,6	2,2	2,5	2,9	3,3	3,8	4,1	4,3	4,405

При цьому для СЗ з тильним контактом, що містить мідь, при потужності випромінювання 70 мВт/см² спостерігається максимальне значення КПД, а для приладних структур з тильним контактом Au КПД незначительно зростає з ростом освітленості. Для СЗ з тильним контактом Cu/Au спостерігається традиційна

логіфімічна залежність напруги холостого ходу від інтенсивності падаючого випромінювання.

Для СЗ з тильним контактом Au величина напруги холостого ходу обмежується на рівні 0,380 В., що свідчить про реалізацію в приладній структурі режиму сквозного діода. Це і обу-

словливает ограничение напряжения холостого хода на уровне 0,351 В.

Для СЭ с тыльным контактом Cu/Au с ростом освещенности наблюдается традиционный рост плотности фототока (см. рис. 1, б), который обусловлен ростом концентрации неравновесных носителей заряда при увеличении плотности потока падающих фотонов. С ростом освещенности шунтирующее сопротивление уменьшается, что обусловлено ростом удельной проводимости базового слоя (см. рис. 1, в). Величина последовательного сопротивления от освещенности практически не зависит. Это свидетельствует о том, что преимущественный вклад в величину последовательного сопротивления приборной структуры вносит сопротивление тыльного и фронтального контакта.

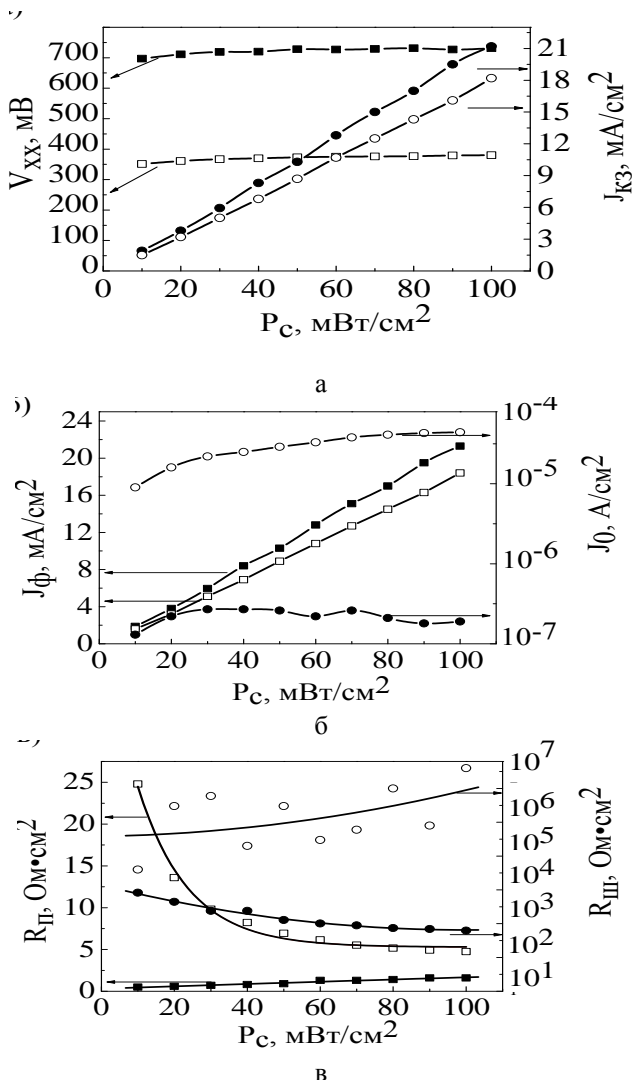


Рис. 1 – Зависимость выходных параметров и световых диодных характеристик СЭ ITO/CdS/CdTe от освещенности: а – V_{xx} (■ – Cu/Au, □ – Au), J_{K3} (● – Cu/Au, ○ – Au); б – J_ϕ (■ – Cu/Au, □ – Au), J_0 (● – Cu/Au, ○ – Au); в – R_P (■ – Cu/Au, □ – Au), $R_{Ш}$ (● – Cu/Au, ○ – Au)

Действительно, если бы на величину последовательного сопротивления СЭ определяющее влияние оказывало удельное сопротивление базового слоя, то с ростом интенсивности солнечного излучения в результате генерации неравновесных носителей заряда в

базовом слое наблюдалось бы снижение R_P . Для СЭ с тыльным контактом Au при росте освещенности также наблюдается традиционный рост плотности фототока. В отличие от СЭ с тыльным контактом Cu/Au наблюдается снижение последовательного сопротивления (см. рис. 1, в). При этом необходимо учесть, что такие СЭ, несмотря на меньшую эффективность по сравнению с СЭ с тыльным контактом Cu/Au, характеризуются на порядок большими значениями шунтирующего сопротивления, величина которого от освещенности практически не зависит. Наблюдаемое отличие влияния мощности излучения на световые диодные характеристики СЭ с различными типами контактов обусловлено тем, что для СЭ с тыльным контактом Au реализуется режим сквозного диода в результате формирования микродиодов, которые параллельны основному туннельному контакту. Поскольку микродиоды включены навстречу основному диоду, то это обуславливает высокие значения шунтирующего сопротивления. Поскольку микродиоды, в отличие от туннельного диода, характеризуются существенными размерами области обеднения, то с ростом интенсивности освещения в результате увеличения концентрации неравновесных носителей заряда происходит снижение их размеров, что приводит к наблюдаемому экспериментально снижению последовательного сопротивления СЭ.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

1. При отсутствии прослойки меди на тыльной поверхности эффективность пленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au ограничивается на уровне 3–4 %, однако при формировании низкоомного туннельного контакта Cu/Au эффективность СЭ на основе ITO/CdS/CdTe увеличивается до 10,4 %.

2. Максимальная эффективность пленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au зафиксирована при мощности солнечного излучения 70 мВт/см² что соответствует мощности солнечного излучения, которая характерна для местности Харьковской области.

Список літератури:

- Bätzner, D. L. Development of efficient and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells [Text] / D. L. Bätzner, A. Romeo, H. Zogg, A. N. Tiwari // *Thin Solid Films*. – 2001. – Vol. 387. – P. 151–154. doi:10.1016/S0040-6090(01)00792-1
- Єрохов, В. Ю. Формування текстур фронтальної поверхні сонячного елемента технологією пористого кремнію [Текст] / В. Ю. Єрохов, А. О. Дружинін, О. В. Єрохова // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 1/5 (73). – С. 4–9. doi:10.15587/1729-4061.2015.36754
- Romeo, N. An innovate process suitable to produce high efficiency CdTe/CdS thin film modules [Text] / N. Romeo, A. Bosio, A. Romeo // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2010. – Vol. 94, № 1. – P. 2–7. doi:10.1016/j.solmat.2009.06.001
- Hill, R. Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells [Text] : Proceeding 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 11–15 April 1994, Amsterdam / by ed. R. Hill, W. Palz, P. Helm. – 1994. – P. 1315–1319.
- Riech, I. Effect of annealing time of CdCl₂ vapor treatment on CdTe/CdS interface properties [Text] / I. Riech, J. L. Peña, O. Ares, A. Rios-Flores, V. Rejón-Moo, P. Rodríguez-Fragoso, J. G. Mendoza-Alvarez // *Semiconductor Science and Technology*. – 2012. – Vol. 27, № 4. – P. 045015. doi:10.1088/0268-1242/27/4/045015

6. Khrypunov, G. Development organic back contact for thin-film CdS/CdTe solar cell [Text] / G. Khrypunov, S. Bereznev, A. Meriuts, G. Kopach, N. Kovtun, N. Deyneko // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2010. – Vol. 11, № 1. – P. 248–251.
 7. Wu, H. N. p-CdTe/n-CdS photovoltaic cells in the substrate configuration [Text] : PhD thesis / H. N. Wu. – Rochester, 2014. – 104 p.
 8. Karpov, V. G. Physics of CdTe Photovoltaics: from Front to Back [Text] / V. G. Karpov, D. Shvydka, Y. Roussillon // *Materials Research Society Proceedings*. – 2005. – Vol. 865. – P. 307–318. doi:[10.1557/proc-865-f10.1](https://doi.org/10.1557/proc-865-f10.1)
 9. Singh, V. P. Analysis of contact degradation at the CdTe-electrode interface in thin film CdTe-CdS solar cells [Text] / V. P. Singh, O. M. Erickson, J. H. Chao // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 78, № 7. – P. 4538–4543. doi:[10.1063/1.359796](https://doi.org/10.1063/1.359796)
 10. Світлодіодний освітлювач [Текст] : пат. 33676 України, МПК: [H01L 21/66](https://patents.google.com/patent/H01L21/66), [G01R 31/26](https://patents.google.com/patent/G01R31/26) / Кіріченко М. В., Зайцев Р. В., Копач В. Р., Хрипунов Г. С., Лісачук Г. В.; заявитель и патентообладатель: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13. – 3 с.
- References**
1. Bätzner, D. L., Romeo, A. H., Zogg, H., Tiwari, A. N. (2001). Development of efficient and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells. *Thin Solid Films*, 387, 151–154. doi:[10.1016/S0040-6090\(01\)00792-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00792-1)
 2. Yerokhov, V. Yu., Druzhynin, A. O., Yerokhova, O. V. (2015). Front surface texture formation of the solar cell by the porous silicon technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5(73)), 4–9. doi:[10.15587/1729-4061.2015.36754](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36754)
 3. Romeo, N., Bosio, A., Romeo, A. (2010). An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94 (1), 2–7. doi:[10.1016/j.solmat.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.001)
 4. In: Hill, R., Palz, W., Helm, P. (1994). Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells. *Proceeding 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam (Netherlands), 1315–1319.
 5. Riech, I., Peña, J. L., Ares, O., Rios-Flores, A., Rejón-Moo, V., Rodríguez-Fragoso, P., Mendoza-Alvarez, J. G. (2012). Effect of annealing time of CdCl₂ vapor treatment on CdTe/CdS interface properties. *Semiconductor Science and Technology*, 27 (4), 045015. doi:[10.1088/0268-1242/27/4/045015](https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/4/045015)
 6. Khrypunov, G., Bereznev, S., Meriuts, A., Kopach, G., Kovtun, N., Deyneko, N. (2010). Development organic back contact for thin-film CdS/CdTe solar cell. *Physics And Chemistry of Solid State*, 11 (1), 248–251.
 7. Wu, H. T. (2014). p-CdTe/n-CdS photovoltaic cells in the substrate configuration. Rochester: University of Rochester, 104.
 8. Karpov, V. G., Shvydka, D., Roussillon, Y. (2005). Physics of CdTe Photovoltaics: from Front to Back. *Materials Research Society Proceedings*, 865, 307–318. doi:[10.1557/proc-865-f10.1](https://doi.org/10.1557/proc-865-f10.1)
 9. Singh, V. P., Erickson, O. M., Chao, J. H. (1995). Analysis of contact degradation at the CdTe-electrode interface in thin film CdTe-CdS solar cells. *Journal of Applied Physics*, 78 (7), 4538–4543. doi:[10.1063/1.359796](https://doi.org/10.1063/1.359796)
 10. Кurychenko, M. V., Zaitsev, R. V., Kopach, V. R., Khrypunov, H. S., Lisachuk, H. V.; assignee: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". (10.07.2008). Luminodiode lamp. Patent UA 33676, МПК: [H01L 21/66](https://patents.google.com/patent/H01L21/66), [G01R 31/26](https://patents.google.com/patent/G01R31/26). Bull. № 13, 3.

Поступила (received) 15.01.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив рівня освітлення на вихідні параметри сонячних елементів на основі CdS / CdTe/ Н. В. Дейнеко/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.3–6. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Влияние уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe/ Н. В. Дейнеко/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.3–6. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Influence of light on the level of output parameters solar cells based on CdS / CdTe/ N. Deyneko/Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.3–6. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дейнеко Наталія Вікторівна – кандидат технічних наук, Національний університет цивільного захисту України, Кафедра прикладної механіки, вул. Чернишевська, 94, г. Харків, Україна, 61023, e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.

Дейнеко Наталья Викторовна – кандидат технических наук, Национальный университет гражданской защиты Украины, Кафедра прикладной механики, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023, e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.

Deyneko Natalya Victorovna – PhD., Department of Applied Mechanics, National University of Civil Protection of Ukraine, Chernyshevskaya str., 94, Kharkov, Ukraine, 61023, e-mail: natalyadeyneko@gmail.com.