

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ХОЛОДУ, КРІОТЕХНОЛОГІЙ
ТА ЕКОЕНЕРГЕТИКИ ім В.С. МАРТИНОВСЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ ЕКОЛОГІЇ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА НАФТОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МАТЕРІАЛИ

XVI Всеукраїнської

науково-технічної

конференції

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ

ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕКОЛОГІЇ

5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса



ОДЕСА

2016

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова:

Сторов Богдан Вікторович – ректор Одеської національної академії харчових технологій, д.т.н., професор.

Замісники:

Поварова Наталія Миколаївна – проректор з наукової роботи Одеської національної академії харчових технологій, к.т.н., доцент,

Косой Борис Володимирович – директор Навчально-наукового інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій, д.т.н., професор.

Члени оргкомітету:

Артеменко С.В.

Бошкова І.Л.

Бошков Л.З.

Василів О.Б.

Гоголь М.І.

Дьяченко Т.В.

Желєзний В.П.

Зацеркляний М.М.

Князева Н.О.

Кологривов М.М.

Котлик С.В.

Крусір Г.В.

Мазур В.О.

Мазур О.В.

Мілованов В.І.

Морозюк Л.І.

Нікулина А.В.

Ольшевська О.В.

Плотніков В.М.

Роганков В.Б.

Роженцев А.В.

Сагала Т.А.

Семенюк Ю.В.

Смирнов Г.Ф.

Тітлов О.С.

Шпирко Т.В.

Хлієва О.Я.

Хмельнюк М.Г.

Хобин В.А.

Цикало А.Л.

Відповідальний за випуск: Тітлов О.С., завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв

Мова видання: українська, російська, англійська

За достовірність інформації відповідає автор публікації

Рекомендовано до друку Радою факультету прикладної екології, енергетики та нафтогазових технологій, протокол № 2 від 21 вересня 2016 року.

А 43 Актуальні проблеми енергетики та екології / Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Херсон: ФОП Грінь Д.С., 2016. – 312 с.

ББК 31:20.1

ISBN 978-966-930-137-6

© Одеська національна академія харчових технологій

© Факультет прикладної екології, енергетики та нафтогазових технологій

СЕКЦІЯ 2:

**ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ
І ТЕПЛОМАСООБМІННІ АПАРАТИ**

**НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ
І ЕНЕРГОМАШИНОБУДУВАННІ**

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕПЛОНОСІЇВ
І РОБОЧИХ ТІЛ**

1. Das, S.K. Pool boiling characteristics of nano-fluids [Text] / SK. Das, N. Putra, W. Roetzel // Int. J. Heat Mass. Transf. – 2003. – Vol.46. – P. 851-862.
2. Bang, I.C. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nanofluids from a plain surface in a pool [Text] / I.C. Bang, Chang S. Heung // Int. J. Heat Mass. Transf. – 2005. – Vol.48. – P. 2407-2419.
3. Peng, H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid [Text] / H. Peng, G. Ding, H. Hu // Exp. Thermal Fluid Sci. – 2011. – Vol.35. – P. 960-970.
4. Железний, В.П. Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанофлюидов в свободном объеме [Текст] / В.П. Железний, Ю.В. Семенюк, А.Г. Никулин, Н.Н. Лукьянов // Вестник МАХ. – 2014. – №.3. – С. 4-9.
5. Никулин, А. Г. Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме [Текст] / А.Г. Никулин, Ю.В. Семенюк, Н.Н. Лукьянов // Холодильная техника и технология. – 2013. – № 4(144). – С. 12–18.
6. Gerardi, C. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video / C. Gerardi, J. Buongiorno, L. Hu, T. McKrell // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – P. 4185–4192.
7. Bowring, R.W. Physical model based on bubble detachment and calculation of steam voidage in the subcooled region of a heated channel [Text] / R.W. Bowring // OECD Halden HPR-10. - 1962.
8. Han, C.Y. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling [Text] / C.Y. Han, P. Griffith // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1965. – Vol. 8. – P. 887–914.
9. Толубинский, В.И. Теплообмен при кипении [Текст] / В.И. Толубинский. - Киев: Наук. думка. - 1980. - 316 с.
10. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие [Текст] / С.С. Кутателадзе. - М.: Энергоатомиздат. - 1990. - 367 с.
11. VDI Heat Atlas [Text] / ed. by P. Stephan, S. Kabelac, M. Kind, H. Martin, D. Mewes, K. Schaber – Second edition. – Berlin: Springer – Verlag, 2010.- 1584 p.
12. NIST Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerants mixtures database (REFPROP) Version 7.1/ M.O. McLinden, S.A. Klein, E.W. Lemmon, A.P.G. Peskin. - Gaithersburg: NIST. – 2003.
13. Железний, В.П. Комплексное экспериментальное исследование теплофизических свойств нанофлюидов изопропиловый спирт/ Al_2O_3 на линии кипения [Текст] / В.П. Железний и др. // XIV российская конференция по теплофизическим свойствам веществ. – Казань. – 2014. – С. 313 -317.

УДК 536.715; 621.564.27

ПЛАВЛЕНИЕ И СВОЙСТВА СОСУЩЕСТВУЮЩИХ ФАЗ МЕТАНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Якуб Л.Н., д-р техн. наук, профессор; Бодюл Е.С.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В представленной работе линия плавления метана предсказана с использованием двух теоретических уравнений состояния: для твердой и жидкой фаз. Уравнения состояния обеих фаз получены в рамках теории возмущений, в которой кристалл или жидкость, состоящие из сферических молекул, выступают в качестве опорной системы, а октуполь-октуполь взаимодействие молекул метана является возмущением.

Ключевые слова: метан, линия плавления, термодинамическая теория возмущения, каноническое уравнение состояния, скачок объема.

The melting line of methane was predicted by two theoretical equations of state: for the solid and liquid phases. Equations of state developed within the framework of perturbation theory, in which the crystal or liquid consisting of spherical molecules is a support system, and octupole-octupole interaction of methane molecules is a perturbation.

Keywords: methane, melting line, thermodynamic perturbation theory, canonical equation of state, volume jump.

Поиск новых энергоёмких систем на основе углеродных материалов, пригодных для хранения и лёгкого извлечения из них молекулярного водорода как топлива, обнаружение метана в конденсированном состоянии на некоторых планетах Солнечной системы, например, на спутнике Сатурна Титане [1] – это основные направления интереса к свойствам метана в области высоких давлений, определяющие актуальность их исследования.

Твердый метан имеет богатую фазовую диаграмму при высоких давлениях [2], при комнатной температуре и $P < 1,6$ ГПа метан кристаллизуется в так называемую фазу 1, стабильную в широком диапазоне температур и давлений, и находящуюся в равновесии с жидкой фазой при высоких температурах.

В работе рассматривается высокотемпературная ГЦК фаза, в которой наблюдается практически свободное вращение молекул, а основной вклад несферических сил вносит октуполь-октупольное взаимодействие молекул CH_4 . По своим свойствам эта фаза близка к отвердевшим инертным газам, что позволяет применить для расчета ее свойств термодинамическую теорию возмущения, где в качестве нулевого приближения выступает кристалл, состоящий из сферических молекул, а в качестве потенциала возмущения – октуполь-октупольное взаимодействие молекул метана.

Мы используем канонические уравнения состояния для твердой и жидкой фаз [3].

Свободная энергия может быть записана в виде:

$$F(V, T) = F^{(c\phi)}(V, T) + \Delta F_{oct},$$

где $F^{(c\phi)}(V, T)$ – свободная энергия Гельмгольца кристалла, состоящего из сферических молекул, которая может быть рассчитана по теоретически обоснованному уравнению состояния, полученному в работе [4]; – поправка на октуполь-октупольное взаимодействие.

Подход к получению уравнения состояния сильно ангармонических кристаллов [4] основан на обобщении Майеровского группового разложения на твердые тела.

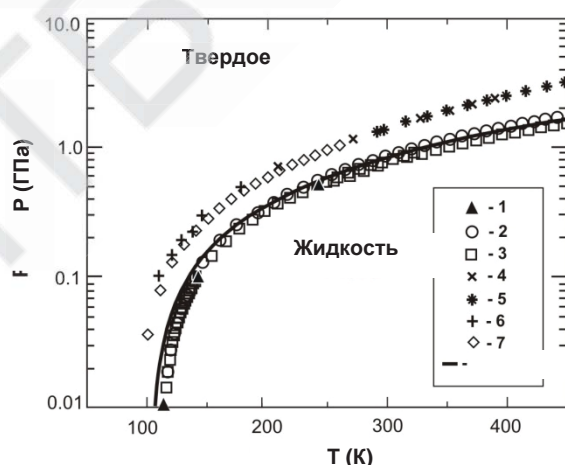
Для проведения практических расчетов в работе [5] была предложена аналитическая аппроксимация канонического уравнения состояния для сильно ангармонического кристалла. Уравнение было записано в простой аналитической форме, подобной той, что была предложена Ван-дер-Хоффом.

В рамках термодинамической теории возмущения поправка на октуполь-октупольное взаимодействие записывается в виде:

$$\Delta F_{oct} = \langle \Delta U_{oct} \rangle - \frac{1}{2kT} [\langle \Delta U_{oct}^2 \rangle - \langle \Delta U_{oct} \rangle^2] + \dots$$

Здесь угловые скобки означают усреднение энергии октуполь-октупольного взаимодействия молекул метана по ориентациям и функции распределения опорной системы с центральным взаимодействием. Усреднение по ориентациям можно проводить также как и для системы свободных ротаторов. При этом мультипольная симметрия нецентрального взаимодействия приводит к тому, что поправка первого приближения обращается в нуль. Ввиду этого, оценку влияния несферичности потенциала взаимодействия на термодинамические свойства системы даёт среднее значение квадрата октуполь-октупольного взаимодействия.

Для жидкой фазы используется теоретическое уравнение состояния [6], которое отлично описывает имеющиеся МС данные Леннард-Джонсовской жидкости.



**Рис. 1 – Зависимость давления от температуры (линия плавления метана).
Сплошная линия – результат расчета авторов данной работы; 1, 2, 3 – данные МС [7]; 4, 5, 6, 7 – экспериментальные данные [8, 9].**

В настоящей работе выполнены расчеты линии плавления опорной системы (Леннард-Джонсовского кристалла), оценен вклад октуполь-октупольного взаимодействия в термодинамические свойства метана, рассчитана P-T зависимость на линии плавления метана, определены плотности сосуществующих фаз и, соответственно, скачок объема на линии плавления.

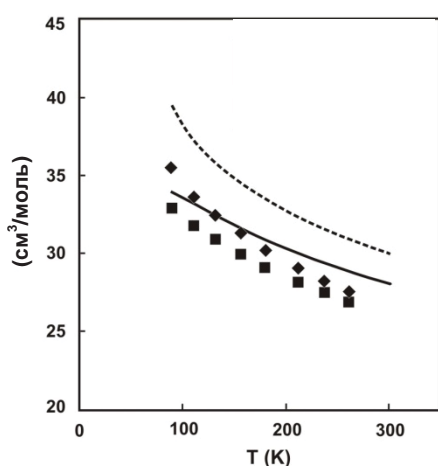


Рис. 2 – Молярні об'єми твердого і рідкого метана на лінії плавлення. Сплошная и пунктирная линии, соответствующие твердой и жидкой фазам – результат расчета авторов данной работы; ■ и ♦ – экспериментальные данные Ченга [10], соответственно для твердой и жидкой фаз.

Результаты расчета линии плавления метана и скачка объема представлены на рисунках 1 и 2, где сравниваются с имеющимися данными машинного эксперимента МС [7] и экспериментальными [8,9,10].

Рассчитанные объемы твердой и жидкой фаз метана находятся в хорошем согласии с экспериментом (3-10)%, но скачок объема заметно завышен.

Выводы

Сравнение результатов расчета линии плавления Леннард-Джонсовского кристалла хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования в интервале приведенных температур $T^*=0.5\dots3.0$, что свидетельствует о хорошем качестве используемых уравнений состояния опорной системы.

Предложенный подход, использующий теоретические уравнения состояния твердой и жидкой фаз метана, позволяет получить результаты, не уступающие по точности результатам компьютерного моделирования. Имеющееся систематическое отклонение результатов расчета равновесного давления на линии плавления метана с опытными данными связано, по-видимому, с неадекватным описанием короткодействующего отталкивания молекул CH_4 потенциалом (12 – 6).

Предложенное уравнения состояния твердого метана не имеет подгоночных параметров и может быть использовано для предсказания термодинамических свойств и линии плавления дейтеро- и галлоидозамещенных метана, которые имеют ГЦК решетку.

Литература

1. Dyches P., Bauer M. Cassini Explores a Methane Sea on Titan (2016, April 26). Retrieved from <http://www.nasa.gov/feature/jpl/cassini-explores-a-methane-sea-on-titan>.
2. Bini R., Pratesi G. High-pressure infrared study of solid methane: Phase diagram up to 30 GPa. // *Physical Review B*. – 1997. – Vol. 55. – No. 22. – P. 14800-14809. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.55.14800>.
3. Yakub L. N., Bodiul O. S. Low-temperature equation of state of solid methane. // *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2016. – Vol. 52. – Iss. 1. – P. 80–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.21691/ret.v52i1.46>.
4. Yakub L., Yakub E. Absolute Helmholtz free energy of highly anharmonic crystals: Theory vs Monte Carlo. // *Journ. Chem. Phys.* – 2012. – Vol. 136. – P. 144508. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3702437>.
5. Yakub L. Theoretical Equation of State for Highly An-harmonic Solids // *International Journal of Thermophysics*. – 2013. – Vol. 35. – No. 9-10. – P. 1957–1965. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10765-012-1381-z>.
6. Kolafa J., Horst L., Vortler H.L., Aim K., Nezbeda I. The Lennard-Jones Fluid Revisited: Computer Simulation Results. // *Molecular Simulation*. – 1993. – Vol. 11. – Iss. 5. – P 305-319. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/08927029308022515>.
7. Spanu L., Donadio D., Hohl D., Galli G. Theoretical investigation of methane under pressure. // *Journal of Chemical Physics*. – 2009. – Vol. 130. – Iss. 16. – P. 164520. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3120487>.
8. Yagi T., Suzuki H. Melting curve of methane to 4.8GPa determined by the ruby pressure-temperature marker. // *Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences*. – 1990. – Vol. 66. – Iss. 9. – P. 167-172. DOI: <http://dx.doi.org/10.2183/pjab.66.167>.
9. J. C. Steyland, J. E. Crawford, and M. Mastoor, *Can. J. Phys* 38, 1546 (1960). Melting temperatures of krypton, xenon, and methane at pressures up to 3000 atm. // *Canadian Journal of Physics*. – 1960. – Vol. 38. – Iss. 11. – P. 1546-1547. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/p60-155>.
10. Cheng V. M., Daniels W. B., Crawford R. K. Melting parameters of methane and nitrogen from 0 to 10 kbar // *Phys. Rev. B*. – 1975. – Vol. 11. – No.10. – P. 3972-3975 DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.11.3972>.
выражение имеет вид:

СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ В СИСТЕМАХ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТИ <i>Петухов И. И., Шахов Ю.В.</i>	37
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВЕКЦІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ Й ВТРАТ НАПОРУ ПРИ ВИМУШЕНОМУ РУСІ НАНОХОЛОДОНОСІЯ НА ОСНОВІ ПРОПІЛЕНГЛІКОЛЮ В ТРУБИ <i>Рябікін С.С., Хлієва О.Я.</i>	41
ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ У НАНОФЛЮЇДІ ІЗОПРОПІЛОВИЙ СПИРТ / НАНОЧАСТИНКИ Al_2O_3 <i>Лозовський Т. Л., Железний В. П., Мотовой И. В., Гордейчук Т.В.</i>	42
АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ <i>Хлієва О.Я.</i>	43
ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ПОСДНАННЯ АВІАЦІЙНИХ БЕНЗИНІВ З АЛІФАТИЧНИМИ СПИРТАМИ <i>Бойченко С.В., Кондакова О.Г.</i>	45
ВРАХУВАННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА УМОВ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ ГТС ТА ВАНТАЖНОЇ СИСТЕМИ LNG СУДНА <i>Волинський Д. А.</i>	46
ТЕРМОДИНАМІЧНА РІВНОВАГА СУМІШІ ХОЛОДОАГЕНТІВ R407C I R410A З КОМПРЕСОРНИМИ МАСТИЛАМИ <i>Геллер В.З., Губанов С.Н.</i>	50
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЛИОФОБНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИДРОФОБИЗИРОВАННОГО СЕЛИКАГЕЛЯ <i>Железний В.П., Лозовський Т.Л., Лук'янов М.М., Нікулін А.Г.</i>	50
УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕТЕРОГЕННИХ ЛІОФОБНИХ СИСТЕМ <i>Железний В.П., Лозовський Т.Л., Лук'янов М.М., Нікулін А.Г.</i>	52
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДКОЇ ФАЗИ РОЗЧИНІВ ДИМЕТИЛОВОГО ЕТЕРУ (DME) З ТРИЕТИЛЕНГЛІКОЛЕМ (TEG) <i>Івченко Д.О., Мотовой І.В., Лозовський Т.Л.</i>	54
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ НАНОФЛЮЇДІВ ІЗОПРОПАНОЛ / Al_2O_3 <i>Лозовський Т.Л., Полюганіч М.П., Швидюк Г.О.</i>	55
ЕКСПЕРИМЕНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШОК ФУЛЕРЕНІВ C_{60} НА В'ЯЗКІСТЬ КОМПРЕСОРНОГО МАСЛА ХФ16-12 І РОЗЧИНІВ ХОЛОДОАГЕНТУ R600a /МАСЛО ХФ16-12 <i>Мороз С.О., Лозовський Т.Л., Лук'янов Н.Н.</i>	57
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ Й РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ ТА В'ЯЗКОСТІ ТРИКОМПОНЕНТНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ СПИРТІВ <i>Полюганіч М.П., Хлієва О.Я., Нікуліна А.С.</i>	59
ТЕРМОДИНАМІЧНА РІВНОВАГА СУМІШІ ХЛОДОГЕНТІВ R407C I R410A З КОМПРЕСОРНИМИ МАСЛАМИ <i>Романенко В.С.</i>	61
ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАНОФЛЮИДАМИ ПРИ ИХ КИПЕНИИ <i>Семенюк Ю.В., Никулин А.Г.</i>	62
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ НАНОФЛЮИДОВ В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ <i>Якуб Л.Н., Бодюл Е.С.</i>	65
ПЛАВЛЕНИЕ И СВОЙСТВА СОСУЩЕСТВУЮЩИХ ФАЗ МЕТАНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ	69
СЕКЦІЯ 3	
Енергоресурсозбереження в нафтогазовому комплексі	72
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ <i>Андерсон А.Ю., Кологривов М.М.</i>	73
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСЧЁТЕ ВРЕМЕНИ СЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА АЗС <i>Бузовский В.П., Кологривов М.М.</i>	77
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ТИСКУ В ЛІНІЙНІЙ ЧАСТИНІ МАГІСТРАЛЬНОГО НАФТОПРОВОДУ ПРИ ЗАПУСКАХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ <i>Григорський С. Я., Середюк М. Д.</i>	81

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ХОЛОДУ, КРІОТЕХНОЛОГІЙ
ТА ЕКОЕНЕРГЕТИКИ ім В.С. МАРТИНОВСЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ ЕКОЛОГІЇ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА НАФТОГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МАТЕРІАЛИ

**XVI Всеукраїнської
науково-технічної конференції**

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕКОЛОГІЇ

5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса

Підписано до друку 28.09.2016 р.
Формат 60x84/8. Папір Офс.
Ум. арк. 34,64 . Наклад 300 примірників.

Видання та друк: ФОП Грінь Д.С.,
73033, м. Херсон, а/с 15
e-mail: dimg@meta.ua
Свід. ДК № 4094 від 17.06.2011