

УДК 674.08

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.44378

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА НАГРУЗОК НА ШНЕК И ЭНЕРГОЗАТРАТ ШНЕКОВЫХ ПРЕССОВ

© М. С. Татарьянц, С. И. Завинский, А. Г. Трошин

*Исследован процесс прессования древесной стружки в шнековых машинах. Установлены процессы, происходящие на разных участках шнека, определены формулы, позволяющие рассчитать нагрузки, действующие на витки шнека, а также определить мощность, требуемую для прессования. Установлены удельные затраты энергии и степень нагрева сырья при прессовании*

**Ключевые слова:** шнековый пресс, брикетирование, расчёт нагрузки, зоны прессования, удельные затраты энергии

*The process of pressing of wood chips in screw machines is researched. It is defined processes taking place in different parts of the screw, formulas allowing to calculate the loads acting on the screw flights, as well as to determine the power required for compression. The unit costs of energy consumption and raw materials in the degree of heat pressing are determined*

**Keywords:** screw press, briquetting, load calculation, pressing zones, unit cost of energy

### 1. Введение

Тенденция к все большему использованию возобновляемых источников энергии наблюдается повсеместно в мире, наиболее сильно проявляясь в крупных странах. Так, например, доля потребления электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников (относительно мирового потребления) в 2006 году составляла 18,4 %, а в 2013 году – 22,1 % [1, 2]. На Украине альтернативная энергетика так же имеет тенденцию к постепенному развитию, которое стимулируется ростом цен на традиционные источники энергии.

Одним из альтернативных источников энергии являются топливные брикеты из биомассы – прессованные отходы деревообработки (стружка, опилки и др.) или сельского хозяйства (шелуха, солома и др.). Таким образом, производство брикетов является актуальным для Украины, поскольку в нашей стране имеется развитая сырьевая база, позволяющая обеспечить достаточно высокие объёмы выпуска данного вида продукции.

Существуют различные способы получения топливных брикетов – на гидравлических, ударно-механических и шнековых прессах. К наиболее часто применяемым относятся шнековые пресса. Если говорить о шнековых машинах в целом, то можно увидеть, что они широко используются на различных производствах для изготовления изделий из пластмасс [3], при получении масла [4]. Так же они используются, в насосном оборудовании [5], в компрессорах [6], для классифицирования, дозирования, для смешивания [7] материалов, при прессовании порошковых материалов, а также для транспортировки сыпучих веществ.

Не смотря на столь обширное применение шнековых машин, не для всех из них были разработаны методики расчёта, позволяющие определять конструктивные параметры установок, их энергопотребление. Например, известны формулы расчёта экструдеров для пластмасс, шнековых транспортёров, а для шнековых же машин, обеспечивающих

прессование материала в условиях сухого трения (а к такому процессу и относится брикетирование на шнековых прессах), это направление остаётся мало разработанным.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В литературных источниках, имеющих отношение к теме данной работы, встречается различная информация, однако информация эта зачастую является не полной либо не относящейся непосредственно к процессам, проходящим в условиях сухого трения.

Так, например, в монографии [8] есть эмпирически полученные формулы для расчёта мощности шнековых машин, однако нет их теоретического обоснования. В книге [9] приводятся формулы, основанные на теоретических выкладках. При этом оба выше названных источника рассматривают только процесс экструзии сырья, находящегося в расплавленном состоянии (экструзия пластмасс).

Работа [10] содержит описание технологии производства прессованных изделий, режимы работы оборудования, но в ней не говорится о сущности процесса прессования, и также нет формул для расчёта мощности привода шнековой машины.

Полезная информация о свойствах брикетов (получаемых прессованием из древесной стружки), давлении и температуре, необходимых для получения продукта заданной плотности имеется в статье [11]. Сведения о развитии процессов и оборудовании для производства топливных брикетов из биомассы, а именно обзор современного оборудования и его характеристики можно получить из статьи [12].

Как можно увидеть, тема прессования или экструдирования сырья с помощью шнековых машин является актуальной, но при этом вопросы расчёта нагрузок на витки шнека и мощности, необходимой для осуществления процесса прессования при его протекании в условиях сухого трения являются недостаточно разработанными, и требует проведения исследований в этом направлении.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является определение нагрузки на витки шнека и расчёт мощности шнековых прессующих машин, работающих в условиях сухого трения.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

- определение стадий прессования сырья по мере его продвижения вдоль шнека;
- установление зависимости между стадиями прессования и конструктивными параметрами установки, а также технологическими параметрами процесса;
- разработка методики расчёта для определения крутящего момента, возникающего на валу шнека, мощности, необходимой для проведения процесса прессования, проведение примерного расчёта по установленным формулам.

### 4. Определение процессов, протекающих на участках шнека и установление расчётных зависимостей

Перемещение и прессование сырья шнеком проходит в такой последовательности: вначале исходное сырьё попадает в загрузочную камеру, откуда транспортирующим шнеком подаётся на рабочую часть шнека.

Во время перемещения шнеком на сырьё действуют силы трения, обусловленные винтовой траекторией движения сырья, во время движения по которой сырьё трётся о стенки канала, а также его поступательным движением (за счёт него сырьё также перемешивается внутри витка).

Давление и температура постепенно возрастают по ходу движения вдоль оси шнека, что обусловлено уплотнением сырья всё в большей и большей степени, а также подогревом от стенок канала. Увеличение плотности обуславливается особенностями конструкции экструдера – это могут быть переменный шаг витков, их переменная глубина или коническая форма шнека. В любом случае, такая конструкция обеспечивает непрерывное уменьшение сечения канала шнека, что и обеспечивает некоторое уплотнение материала.

Стоит отметить, что на начальном этапе прессование измельчённого сырья не требует больших усилий, поскольку значительное увеличение плотности достигается путём смятия частиц и их максимальным сближением за счёт этого. Применительно к коническому шнеку уплотнение материала на начальном этапе может достигать 25–35 %. Однако, когда максимальная плотность, достижимая в результате этих процессов получена, дальнейшее увеличение плотности потребует больших усилий.

Данные усилия действуют в зоне последнего витка шнека, которая показана на рис. 1 (где шнек изображён в разрезе сбоку). В данной зоне происходит уплотнение сырья между витком шнека и неподвижным материалом "пробки".

К концу зоны уплотнения материал достигает конечной плотности, после чего начинается зона проталкивания. Материал в этой зоне начинает движение в сторону выгрузки со скоростью, равной осе-

вой составляющей относительной скорости материала относительно шнека  $w_{отн}$ , а его плотность остаётся практически неизменной в течении дальнейшего процесса прессования.

Как видно на рис. 2, где шнек изображён в развёрнутом виде, зона проталкивания является питающей зоной, которая наращивает "пробку" – непрерывно формирующийся в профильном канале брикет. Поскольку шнек вращается, материал, подаваемый из зоны проталкивания, наращивает брикет по кругу.

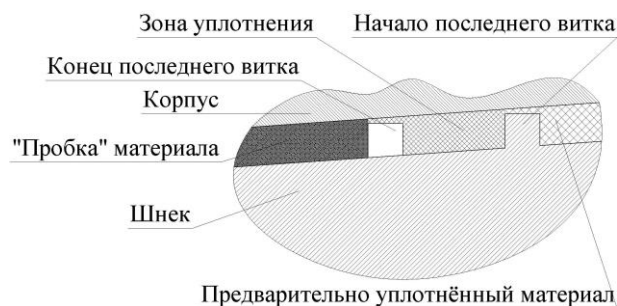


Рис. 1. Расположение зоны уплотнения на последнем витке шнека

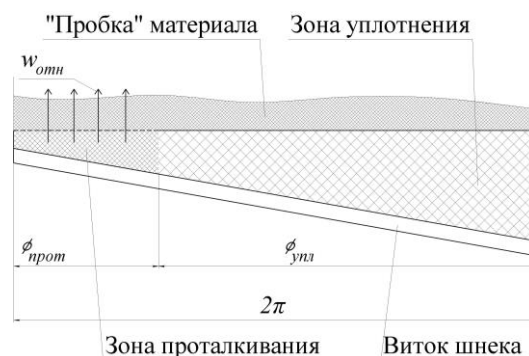


Рис. 2. Развёртка последнего витка шнека

Таким образом, при взгляде на последний виток шнека с торцевой стороны можно выделить зоны уплотнения и проталкивания, имеющие угловую ширину  $\phi_{упл}$  и  $\phi_{прот}$  соответственно (рис. 3).

Определим угловую ширину зон уплотнения и проталкивания. Вначале предположим, что зона проталкивания имеет угловую ширину  $2\pi$  рад.



Рис. 3. Расположение зон уплотнения и проталкивания

Это означает, что весь последний виток шнека занят зоной проталкивания. Тогда производительность (назовём её "геометрической") пресса составит:

$$Q_{geom} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot (t - \delta) \cdot \frac{n}{60} \cdot \rho_0, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр вершин нарезки шнека, м;  $n$  – частота вращения шнека, об/мин;  $d$  – диаметр сердечника шнека, м;  $t$  – шаг нарезки шнека, м;  $\delta$  – толщина витка, м;  $\rho_0$  – конечная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Как видно, геометрическая производительность зависит только от конструктивных параметров пресса и заданной плотности брикета.

В реальности большая часть последнего витка занята зоной уплотнения, а зона проталкивания имеет определённую угловую ширину  $\phi_{прот} < 2\pi$ , которая связана с фактической производительностью следующим выражением:

$$Q = Q_{geom} \cdot \frac{\phi_{прот}}{2\pi}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что чем больше производительность, тем больше угловая ширина зоны проталкивания, причём фактическая производительность всегда меньше геометрической.

Зная угловую ширину зоны проталкивания, мы можем получить ширину зоны уплотнения из выражения:

$$\phi_{прот} + \phi_{упл} = 2\pi. \quad (3)$$

Ширина зоны уплотнения связана с плотностью предварительно уплотнённого материала следующей зависимостью:

$$\phi_{упл} = \phi_{прот} \cdot \frac{\rho_0 - \rho_{ПВ}}{\rho_{ПВ}}, \text{ рад}. \quad (4)$$

где  $\rho_{ПВ}$  – начальная плотность материала после предварительного уплотнения.

Для того чтобы определить усилие, действующее на сырьё со стороны шнека, необходимо знать характер изменения давления при уплотнении сырья. Примем экспоненциальный характер изменения давления в зоне уплотнения (рис. 4), что подтверждается нашими данными [4], а также информацией из других источников.

В зоне проталкивания примем давление постоянным, равным максимальному давлению в зоне уплотнения  $P_{max}$ . Это давление определяется экспериментально и соответствует необходимой плотности брикета. Тогда усилие давления шнека на материал будет определяться выражением (5):

$$F_{упл} = \int_0^{\phi_{упл}} \frac{(D^2 - d^2) \cdot e^{\frac{\ln(P_{max})}{\phi_{упл}} \cdot \phi}}{8} d\phi = \frac{D^2 - d^2}{8} \cdot \frac{\phi_{упл}}{\ln(P_{max})} \cdot (P_{max} - 1), \text{ Н}, \quad (5)$$

где  $P_{max}$  – давление, нужное для получения продукта заданной плотности, Па.

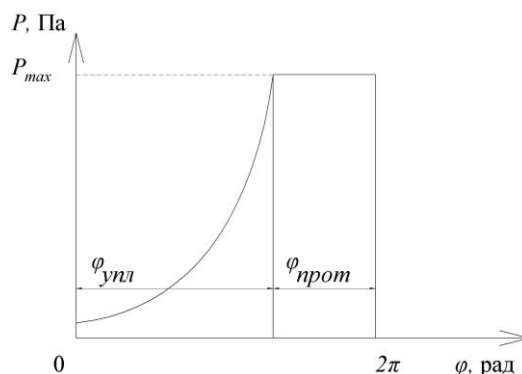


Рис. 4. Изменение давления во время продвижения по зонам прессования при экспоненциальном законе его возрастания

Расчёт осевой силы в зоне проталкивания будет производиться аналогичным образом, но с учётом того, что давление в зоне проталкивания неизменно.

$$F_{прот} = \phi_{прот} \cdot \frac{(D^2 - d^2) \cdot P_{max}}{8}, \text{ Н}. \quad (6)$$

Осевая сила для последнего витка шнека будет являться суммой осевых сил в зоне уплотнения и проталкивания.

$$F = F_{упл} + F_{прот}. \quad (7)$$

Имея осевое усилие, рассчитаем крутящий момент, действующий на вал шнека с помощью проецирования осевой силы на поверхность шнека:

$$M = \frac{D \cdot F \cdot \zeta \cdot \cos^2 \alpha}{2}, \text{ Нм} \quad (8)$$

где  $\zeta$  – коэффициент трения материала по виткам шнека;  $\alpha$  – угол подъёма винтовой линии.

Получив крутящий момент на валу, рассчитаем мощность, необходимую для прессования при известной частоте оборотов и КПД привода

$$N = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (9)$$

Приведём пример расчёта усилий, действующих на витки шнека и мощности необходимой для прессования.

Исходные данные:  
 $F=300$  кг/ч;  $\rho_0=1200$  кг/м<sup>3</sup>;  $P_{max}=120$  МПа;  
 $n=450$  об/мин;  $\zeta=0,25$ ;  $D=0,08$  м;  $\alpha=6,8^\circ$ .  
 $D=0,08$  м;  $d=0,06$  м;  $t=0,03$  м;  $\delta=0,01$  м;

Рассчитаем геометрическую производительность пресса по ф-ле (1):

$$Q_{geom} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,08^2 - 0,06^2) \times (0,03 - 0,01) \cdot \frac{450}{60} \cdot 1200 = 1700 \text{ кг/ч}.$$

Далее найдём угловую ширину зоны проталкивания, выразив её из уравнения (2):

$$\varphi_{\text{прот}} = \frac{2\pi \cdot 140}{1700} = 1,1 \text{ рад} = 64^\circ.$$

Вычислим угловую ширину зоны уплотнения по выражению (3):

$$\phi_{\text{упл}} = 2\pi - 1,1 = 5,2 \text{ рад} = 296^\circ.$$

Воспользуемся выражением (5) для определения осевой силы, действующей в зоне уплотнения:

$$F_{\text{упл}} = \frac{(0,08^2 - 0,06^2)}{8} \times \\ \times \frac{5,2}{\ln(100 \cdot 10^6)} \cdot (120 \cdot 10^6 - 1) = 11700 \text{ Н}.$$

Получим осевую силу, действующую в зоне проталкивания с помощью ф-лы (6):

$$F_{\text{прот}} = 0,52 \cdot \frac{(0,08^2 - 0,06^2) \cdot 120 \cdot 10^6}{8} = 47000 \text{ Н}.$$

Суммарное осевое усилие для последнего витка будет равняться

$$F = 11700 + 47000 = 58700 \text{ Н}.$$

Крутящий момент, действующий в области последнего витка, по формуле (8):

$$M = \frac{0,08 \cdot 58700 \cdot 0,25 \cdot \cos^2 6,8}{2} = 430 \text{ Нм}.$$

Определим мощность, необходимую для прессования по ур-ю (9):

$$N = 2 \cdot \pi \cdot \frac{450}{60} \cdot 360 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ кВт}.$$

## 5. Результаты исследования

Удельные затраты энергии будут составлять  $\frac{17 \text{ кВт}}{300 \text{ кг/ч}} = 0,068 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$ . Если принять потери влаги сырья 3 %, то нагрев сырья в процессе брикетирования составит 110–130 °С. Проведя расчёт, мы видим, что основные усилия прессования приходятся на зону проталкивания, в зоне же уплотнения усилия значительно меньше (47000 и 11700 Н соответственно).

## 6. Выводы

1. Наибольшее уплотнение материала достигается на последнем витке шнека. Там можно выделить две зоны – зону уплотнения, в которой сырьё не движется в сторону выгрузки, а уплотняется между шнеком и "пробкой" брикета, а также зону проталкивания, в которой материал движется в сторону выгрузки, а плотность материала и давление неизменны.

2. Ширина зон уплотнения и проталкивания зависит от требуемой плотности брикета, частоты вращения шнека, конструктивных параметров шнека. Для того чтобы увеличить зону проталкивания и, соответственно производительность, при неизменной

плотности брикета, необходимо увеличить плотность материала, подаваемого в зону уплотнения.

3. Разработана методика расчёта, позволяющая определить усилие, действующее на шнек в зоне последнего витка, крутящий момент на валу шнека, требуемую мощность, затрачиваемую на прессование. Приведённый в примере расчёт показывает, что основное усилие развивается в зоне проталкивания, а удельные затраты энергии на прессование составляют 0,068 кДж·ч/кг, при этом материал разогревается на 110–130 °С, что достаточно для плавления лигнина, содержащегося в древесной стружке и обеспечения оптимальных механических и реологических свойств брикета.

## Литература

1. Renewables Global status report: 2007 [Electronic resource] / Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2007. – Available at: [https://web.archive.org/web/20090611211442/http://www.ren21.net/pdf/RE2007\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](https://web.archive.org/web/20090611211442/http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf)
2. Renewables Global status report: 2014 [Electronic resource] / Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2014. – Available at: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf)
3. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов. 1-ое издание [Текст] / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. – СПб: Профессия, 2008. – 464 с.
4. Кошевой, Е. П. Технологическое оборудование предприятий производства растительных масел [Текст] / Е. П. Кошевой. – СПб: ГИОРД, 2001. – 368 с.
5. Чебаевский, В. Ф. Насосы и насосные станции [Текст] / В. Ф. Чебаевский, К. П. Вишневецкий и др. – М.: Агропромиздат, 1989. – 416 с.
6. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии. ФРГ [Текст] / Х. Геррман; пер. с нем.; под ред. Л. М. Фридмана. – Л., "Химия", 1975.
7. Скакун, В. А. Винтовые компрессоры [Текст] / В. А. Скакун. – Л.: Машиностроение, 1970. – 400 с.
8. Соколов, М. В. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин (Монография) [Текст] / М. В. Соколов, А. С. Клинков, О. В. Ефремов, П. С. Беляев, В. Г. Однолько. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 248 с.
9. Мак-Келви, Д. М. Переработка полимеров [Текст] / Д. М. Мак-Келви; пер. с англ. Ю. В. Зеленева, Б. П. Пашинина, Э. И. Родина. – М.: Химия, 1965. – 444 с.
10. Гомонай, М. В. Технология изготовления топливных брикетов (биотопливо) [Текст] / М. В. Гомонай // Шпindelъ. – 2006. – № 1.
11. Завинский, С. И. Влияние давления прессования и температуры на свойства брикетов из древесной стружки [Текст] / С. И. Завинский // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2012. – №10.
12. Трошин, А. Г. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомасс [Текст] / А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев, И. А. Тельнов, С. И. Завинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 8(45). – С. 36–40. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/2874/2677>

## References

1. Renewables Global status report: 2007 (2007). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available at: [https://web.archive.org/web/20090611211442/http://www.ren21.net/pdf/RE2007\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](https://web.archive.org/web/20090611211442/http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf)

2. Renewables Global status report: 2014 (2014). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available at: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf)

3. Kryzhanovskij, V. K., Kerber, M. L., Burlov, V. V. (2008). Proizvodstvo izdelij iz polimernyh materialov. First edition. SPb: Professija, 464.

4. Koshevoj, E. P. (2001). Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij proizvodstva rastitel'nyh masel. Spb: GIOR, 368.

5. Chebaevskij, V. F., Vishnevskij, K. P. et. al. (1989). Nasosy i nasosnye stancii. Moscow: Agropromizdat, 416.

6. Gerrman, H.; Fridman, L. M. (Ed.) (1975). Shnekovye mashiny v tehnologii. FRG. Lviv: "Himija".

7. Skakun, V. A. (1970). Vintovye kompressory. Lviv: Mashinostroenie, 400.

8. Sokolov, M. V., Klinkov, A. S., Efremov, O. V., Beljaev, P. S., Odnol'ko, V. G. (2004). Avtomatizirovannoe proek-

tirovanie i raschet shnekovyh mashin. Moscow: Mashinostroenie-1, 248.

9. Mak-Kelvi, D. M. (1965). Pererabotka polimerov. Moscow: Himija, 444.

10. Gomonaj, M. V. (2006). Tehnologija izgotovlenija toplivnyh briketov (biotoplivo). Shpindel', 1.

11. Zavinskij, S. I. (2012). Vlijanie davlenija pressovaniya i temperatury na svojstva briketov iz drevesnoj struzhki. Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta "HPI", 10.

12. Troshin, A. G., Moiseev, V. F., Tel'nov, I. A., Zavinskij, S. I. (2010). Development of processes and equipment for manufacture of fuel briquettes from the biomass. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8 (45), 36–40. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2874/2677>

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Цейтлін М. А.  
Дата надходження рукопису 20.05.2015*

**Трошин Алексей Георгиевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра интегрированных технологий, процессов и аппаратов, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: troshin@i.ua

**Завинский Сергей Иванович**, аспирант, кафедра интегрированных технологий, процессов и аппаратов, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: zowa333@mail.ru

**Татарьянц Максим Сергеевич**, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: tatarjants.maxim@yandex.ru

УДК 504.75.06

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.44346

## ПРОГНОЗ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУТКУ СЛАНЦЕВОГО ГАЗУ НА ОЛЕСЬКІЙ ПЛОЩІ

© К. Ю. Терентьева

*Охарактеризовані екологічні ризики та причини їх утворення на прикладі Олеської ділянки. Зроблена спроба гармонізувати підходи, які вже існують в практиці, для оцінки впливу видобування сланцевого газу на навколишнє середовище. Представлені методологічні аспекти оцінки впливу, які базуються на визначенні трьох параметрів: просторового, тимчасового та інтенсивності дії*

**Ключові слова:** екологічні ризики, сланцевий газ, навколишнє середовище, комплексна оцінка, шкала оцінювання

*Environmental risks and the reasons a for their formation are examined on example of Olesk shale area. The harmonization of the approaches that already exist in practice is attempted, to assess the impact of shale gas on the environment. Methodological aspects of impact assessment are presented based on the determination of three parameters: spatial, temporal and intensity of exposure*

**Keywords:** environmental risks, shale gas, environment, integrated assessment, scale of assessments

### 1. Вступ

Україна в загальному залежить від імпорту енергоресурсів, в першу чергу природного газу. Питання пошуку нових джерел енергетичного забезпечення стає все більше актуальним, зокрема видобування газу з нетрадиційних покладів. Проте, незважаючи на вдалий досвід деяких країн (зокрема США) у розробці та видобутку "нетрадиційно-

го" газу, екологічні аспекти залишаються недостатньо вивченими.

Олеська площа знаходиться на території Львівської (Буський, Жидачівський, Жовківський, Золочівський, Кам'янка-Бузький, Миколаївський, Перемишлянський, Пустомитівський, Сокальський райони) та Івано-Франківської областей (майже повністю охоплює територію Глумацького, Галицького,