

4. Перга Т. Міжнародні водні конфлікти – нова загроза стабільному розвитку / Т. Перга. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.uaforeignaffairs.com/article.html?id=651>>.

5. Егошин А.В. Без воды и ни туды, и ни сюды / А.В. Егошин. [Электронный ресурс]. – Доступный з <http://www.priroda.su>>.

6. Проблеми прісної води. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.npblog.com.ua/index.php/ekologiya/problemi-prisnoyi-vodi.html>>.

7. Землі загрожують війни за водні ресурси. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.otherside.com.ua/news/detail.php?lang=1&id=12419>>.

8. Творцві "віртуальної води" присудили премію. [Електронний ресурс]. – Доступний з [http://www.greenparty.ua/news/news\\_19285.html](http://www.greenparty.ua/news/news_19285.html)>.

#### **Стадник М.Е. Виртуальная вода**

Уточнена суть поняття "виртуальная вода", его право на существование и приращение в международных отношениях; предложены меры по уменьшению расходов воды человечеством.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, "виртуальная вода", товар, банки воды.

#### **Stadnyk M.Ye. Virtual water**

Is specified essence the concept of "virtual water", its right to existence and application in international relations; proposes measures to reduce costs of water by mankind.

**Keywords:** water resources, "virtual water", goods, jars of water.

### **3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ**

УДК 066.021 Проф. В.М. Атаманюк, д-р техн. наук; проф. Я.М. Гумницький, д-р техн. наук; аспір. М.І. Мосюк – НУ "Львівська політехніка"

#### **КІНЕТИКА ВНУТРІШНЬОДИФУЗІЙНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ "ЕНЕРГЕТИЧНОЇ" ВЕРБИ**

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи з пор і капілярів частинок подрібненої швидкорослої "енергетичної" верби під час фільтраційного сушіння.

**Постановка проблеми.** Відомо, що Україна є енергетично залежною державою. На сьогодні одним із основних палив в Україні залишається природний газ – його частка в структурі споживання первинних енергоносіїв складає становить 40 %. При цьому, завдяки власним ресурсам Україна забезпечує себе газом лише на 35 %, а решту необхідного обсягу потрібно імпортувати [1]. За даними експертів Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України, розвіданих запасів нафти та газу за теперішніх темпів споживання вистачить на 40-50 років, вугілля – близько 400 років [2]. Тому сучасною тенденцією розвитку економіки є перехід від вичерпних первинних джерел енергії до відновлювальних джерел енергії. Одним із таких джерел енергії, які широко застосовують у розвинених країнах світу та в Україні зокрема, є швидкоросла "енергетична" верба [3]. В Україні вирощують швидкорослу "енергетичну" вербу у Волинській, Тернопільській, Львівській та інших областях. Застосування швидкорослої "енергетичної" верби як джерела енергії потребує її подрібнення і наступного сушіння. Для сушіння подрібненої "енергетичної" верби в промисловості використовують барабанні сушарки та киплячий шар. Відомо, що затрати на її висушування становлять приблизно 30 % усіх затрат на виробництво паливних брикетів. Тому дослідження процесу висушування з метою зменшення енергетичних затрат є актуальною проблемою. Відомо, що фільтраційне сушіння є одним із високоефективних методів, суть якого полягає у профільтовуванні теплового агента в напрямку "вологий матеріал – перфорована перегородка" завдяки перепаду тисків [4-6]. Тому для висушування подрібненої "енергетичної" верби ми обрали саме цей метод.

**Метою роботи** є дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібненої "енергетичної" верби та визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії залежно від температури теплового агента.

**Характеристика об'єкта дослідження.** Після подрібнення "енергетична" верба – це суміш частинок (рис. 1), що мають волокнисту і здебільшого циліндричноподібну форму, зокрема: голкоподібну ( $L > 20 D$ ), подовгасту ( $15 D \leq L \leq 20 D$ ), грубу подовгасту ( $L \approx 10 D$ ), тонку подовгасту ( $5 D \leq L \leq 10 D$ ), округлу  $L \approx 2 D$ . Пористість такого шару матеріалу перебуває в межах

$0,750 \leq \varepsilon \leq 0,831 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а початковий вологовміст свіжозрубаної "енергетичної" верби становить  $\omega^c = 0,6 \div 2,0 \text{ кг } H_2O/\text{кг сух.м}$  [7].

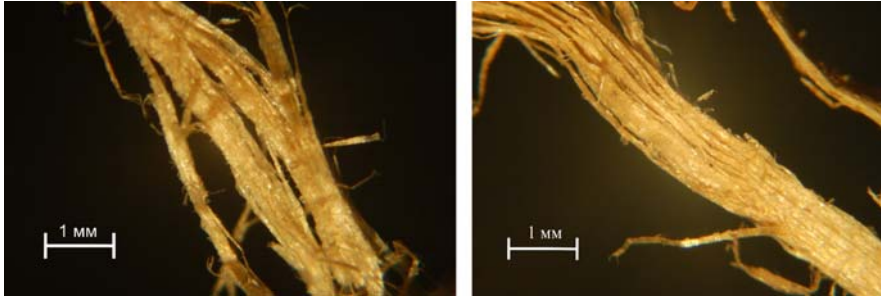


Рис. 1. Частинки подрібненої енергетичної верби (збільшено 50 x)

Дослідження кінетики фільтраційного сушіння та дифузії води з частинок подрібненої "енергетичної" верби в навколишнє середовище проводили на експериментальній установці (рис. 2) за методикою, наведеною у [8]. Температура над шаром матеріалу підтримувалась постійною з точністю  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  за допомогою терморегулятора РТ-100 і двох термодатчиків, які були розміщені над шаром матеріалу в різних точках (у центрі контейнера і 30 мм від його стінки).

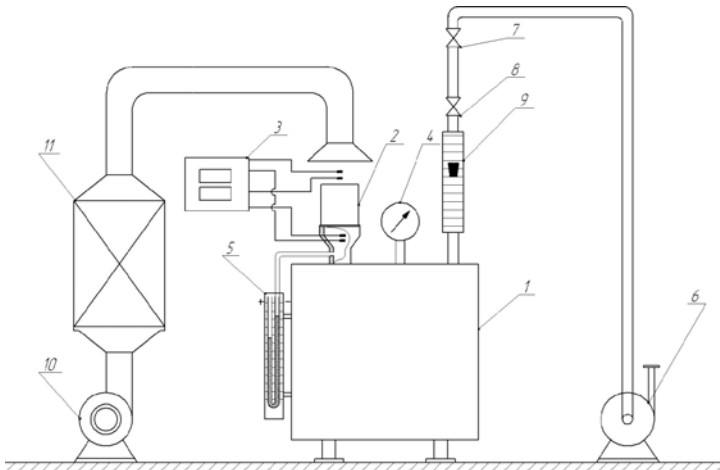


Рис. 2. Схема експериментальної установки для дослідження кінетики сушіння подрібненої "енергетичної" верби: 1 – ресивер; 2 – контейнер; 3 – вимірювальний прилад; 4 – вакуумметр; 5 – U-подібний манометр; 6 – вакуум-насос; 7, 8 – регулювальний і запірний вентилі; 9 – ротаметр; 10 – вентиль; 11 – калорифер

**Результати експериментальних досліджень.** Кінетику фільтраційного сушіння подрібненої "енергетичної" верби наведено на рис. 3. Зміну вологовмісту визначали ваговим методом у розрахунку на суху масу. Як бачимо з рис. 3, кінетичні криві мають класичний характер, тобто на них можна виок-

ремити "перший" та "другий" періоди. Однак механізм фільтраційного сушіння є дещо відмінним [9], ніж у випадку конвективного сушіння в стаціонарному шарі, коли в першому періоді видаляється вільна вода, а в другому – зв'язана. Відомо, що фільтраційне сушіння має зональний характер [10] і зона масообміну переміщується в напрямку руху теплового агента, внаслідок цього в шарі одночасно існують сухий і вологий матеріал, тобто одночасно видаляється вільна і зв'язана вода. Частка сухої частини зростає, а вологої зменшується. Тому на кінетичній кривій сушіння "перший" умовний період існує доти доки тепловий агент повністю насичується водою, а з шару видаляється однакова кількість води внаслідок розширення зони масообміну в напрямку до перфорованої перегородки. Як тільки зона масообміну сягає перфорованої перегородки, тепловий агент лише частково насичується водою і кількість води, що виноситься із шару, зменшується, тому на кінетичній кривій маємо "другий" умовний період.

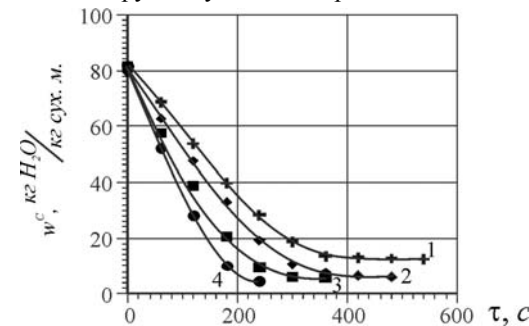


Рис. 3. Кінетика сушіння подрібненої "енергетичної" верби за різних температур теплового агента:

$v_0 = 1,74 \text{ м/с}$ ;  $H = 120 \text{ мм}$ ; 1 –  $t = 40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 60^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = 80^\circ\text{C}$ ; 4 –  $t = 100^\circ\text{C}$ .

Метод визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії базується на математичному розв'язку диференційного рівняння внутрішньої дифузії. Під час аналізу кінетики було зроблено такі допущення:

- частинки подрібненої верби мають циліндричну подовгувату форму ( $d \ll L$ );
- вода рівномірно розподілена в об'ємі частинки;
- кожна частинка рівномірно обдувається повітряним потоком;
- на поверхні частинок встановлюється концентрація води, що не змінюється в часі.

Враховуючи те, що пористість шару є значною ( $\varepsilon = 0,814$ ), а тепловий агент вільно фільтрується крізь шар матеріалу, можемо допустити у першому наближенні, що числа  $Bi_\theta$  є великими, з подальшою перевіркою їх значення, а саму задачу звести до граничних умов першого роду. Для частинок циліндричної форми таке рівняння має вигляд [11]:

$$\frac{\partial \omega_c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left( \frac{\partial^2 \omega_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) \quad (1)$$

З граничними умовами:

$$\begin{cases} \omega_c(r, 0) = \omega_c \\ -D_w \cdot \left( \frac{\partial \omega}{\partial r} \right)_{r=R} = \beta \cdot (x_n - x) \\ \left( \frac{\partial \omega_c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_{(r,0)} = \omega_0; \quad \omega_{(R,\tau)} = \omega_c; \quad \frac{\partial \omega_{(0,\tau)}}{\partial r} = 0;$$

$$\frac{\partial \omega_c}{\partial \tau} = D_w^* \cdot \left( \frac{\partial^2 \omega_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \omega_c}{\partial r} \right) \cdot \frac{\omega - \omega_c}{\omega_0 - \omega_c} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot F_0}, \quad (3)$$

де:  $D_w^*$  – коефіцієнт внутрішньої дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$ ,  $R$  – поточний радіус і радіус частинки,  $\text{м}$ ;  $\omega_c$ ,  $\omega_0$  – поточний і гігроскопічний вологовміст у середині частинки верби  $\text{кг H}_2\text{O}/\text{кг сух. мат.}$ ,  $\mu_n$  – корені характеристичного рівняння,  $x_n$ ,  $x$  – вологовміст повітря біля поверхні частинки, (його значення визначається з умов рівноваги  $x_n = f(w_f^c)$ ) і поточний вологовміст теплового агента,  $\text{кг H}_2\text{O}/\text{кг сух. пов.}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі води від частинок подрібненої "енергетичної" верби до газового потоку,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\tau$  – час,  $\text{с}$ ,  $F_0 = \frac{D_w^* \cdot \tau}{R^2}$  – число Фур'є.

Використовуючи наведені вище допущення, розв'язок системи (1) – (3) може бути представлений у вигляді:

$$\frac{\omega_c}{\omega_0} = \sum_{i=1}^n B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot F_0} \quad (4)$$

де:  $B_n = 4 / \mu_n^2$ ,  $\mu_n = J_0(\mu)$ ,  $J_0$  – функція Бесселя нульового порядку.

Розв'язок рівняння (4), що встановлює залежність зміни поточної концентрації в часі наведено в [11]. З граничної умови формується дифузійне число Біо ( $Bi_0 = \beta \cdot R / D_w$ ), значення якого визначає кінетику процесу. Малим числам  $Bi_0$  відповідає зовнішньо-дифузійна кінетика. За великих чисел  $Bi_0$  (в дійсності при  $Bi_0 > 50$  [11]) кінетика визначається виключно внутрішньо-дифузійним перенесенням. Існує також проміжна область, в якій обидва механізми перенесення існують одночасно. Вологі частинки подрібненої "енергетичної" верби містять незначну кількість вільної поверхневої води і в основному зв'язану вологу, яка випаровується у другому періоді. Враховуючи те, що під час практичних розрахунків процесів сушіння використовують середній вологовміст у частинці  $\omega_0$ , який можна визначити експериментально, нами використаний метод, що базується на підстановці експериментальних даних у теоретичні розв'язки з метою визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії.

Ми використали ту обставину, що за чисел Фур'є  $F_0 > 0,3$  [11] досить обмежитися першим коренем характеристичного рівняння (виділити регулярний режим). Справедливість прийнятого допущення можна встановити перевіркою  $Bi_0$ . При цьому вибираємо найбільші значення коефіцієнта внут-

рішньої дифузії, що становить  $D_w^* = 3,5213 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$  для подрібненої "енергетичної" верби, еквівалентний діаметр каналів між частинками  $d_{\text{екв}} = 4,63 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ , та коефіцієнта масовіддачі для умов досліду  $\beta = 1,559 \text{ м}/\text{с}$  розраховане найменше значення дифузійного числа Біо становить  $Bi_0 = 5,4867 \cdot 10^5 \gg 50$ , що підтверджує чисто внутрішньо-дифузійний режим сушіння, і справедливість прийнятої нами гіпотези щодо граничних умов першого роду.

Для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії прологарифмуємо залежність (4) і представимо її у вигляді графічної залежності  $\ln(\bar{w}^c/w_f^c)$  від  $\tau$  (рис 4.). Як бачимо з графічної залежності,  $\ln(\bar{w}^c/w_f^c) \div \tau$  має лінійний характер і за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис можна визначити коефіцієнт дифузії  $D_w^*$ .

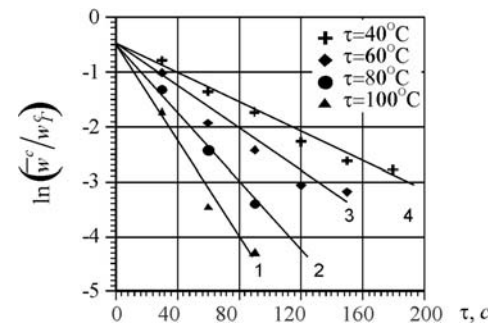


Рис. 4. Залежність  $\ln(\bar{w}^c/w_f^c)$  від часу сушіння подрібненої "енергетичної" верби

$$D_w^* = \frac{tg\alpha \cdot R^2}{\mu^2}, \quad (5)$$

$$\text{де } tg\alpha = \frac{\ln(\bar{w}^c/w_f^c)}{\tau}.$$

На рис. 5 наведено графічну залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії  $D_w^*$  від температури. Як бачимо, з ростом температури теплового агента значення коефіцієнта внутрішньої дифузії  $D_w^*$  води з частинок подрібненої "енергетичної" верби в навколишнє середовище зростає лінійно.

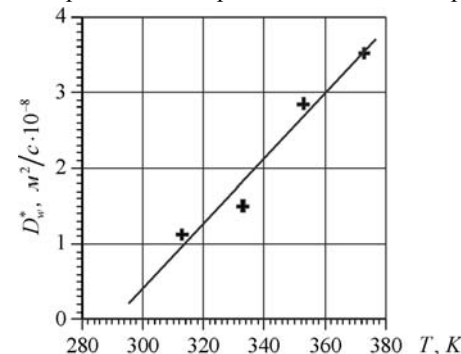


Рис. 5. Залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури для шару подрібненої "енергетичної" верби і швидкості руху теплового агента  $w=1,74 \text{ м}/\text{с}$

На рис. 5 представлено залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури для подрібненої "енергетичної" верби

Тому її можна апроксимувати такою залежністю:

$$D_w^i = D_w^{293} + 0,427 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293). \quad (6)$$

Відомі значення коефіцієнта дифузії вологи в навколишнє середовище під час сушіння залежать від структурної будови частинок, вологовмісту і температури і для різних об'єктів сушіння перебувають у межах від  $10^{-6}$  (капілярно пористі матеріали) до  $10^{-12}$  м/с (мало пористі матеріали) [12, 13], що корелюється із значеннями, які ми отримали.

Порівняння значень коефіцієнта внутрішньої дифузії, розрахованих за залежністю (6) з експериментально визначеними для температур (300-380 К) і швидкості руху теплового агента ( $w = 0,26 \pm 2,0$  м/с), не перевищує 14,3 %

#### Висновки:

- Отримана розрахункова залежність дає змогу визначити коефіцієнт дифузії вологи з частинок подрібненої "енергетичної" верби в навколишнє середовище в широких межах температури (від 300 до 380 К) і швидкості руху теплового агента  $w = 0,26 \pm 2,0$  м/с.
- Отримана розрахункова залежність дає змогу прогнозувати затрати теплової енергії, розрахувати оптимальні параметри процесу та встановити економічну доцільність застосування фільтраційного методу сушіння на етапі проектування сушильного обладнання.

#### Література

- Півняк Г.Г. Енергозбереження в промисловому секторі економіки України / Г.Г. Півняк // Наука та інновації. – 2006. – № 2.
- Кудря С.О. Законодавча база відновлюваної енергетики в Україні / С.О. Кудря // Відновлювана енергетика ХІІ століття : матер. 10-ї ювілейної Міжнар. наук. практ. конф. (14-18 вересня 2009 р). [Електронний ресурс]. – Доступний з [http://www.ive.org.ua/conference\\_2009/kudrya%20res%20nikolaevka.pdf](http://www.ive.org.ua/conference_2009/kudrya%20res%20nikolaevka.pdf).
- Цивенкова Н.М. Альтернативні джерела енергії: чи врятують вони Україну від енергетичної залежності та екологічної катастрофи? / Н.М. Цивенкова, О.О. Самілін // Новини агротехніки. – 2009. – № 1.
- Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 – Процеси і апарати хімічної технології / НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2001. – 19 с.
- Ханик Я.М. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище сідання / Я.М. Ханик, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, П.В. Білей // Науковий вісник УкрДІТУ : зб. наук.-техн. праць. – Сер.: Проблема деревообробного виробництва. – Львів : Вид-во УкрДІТУ. – 1994. – Вип. 2. – С. 29-39.
- Ханик Я.М. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище сідання / Я.М. Ханик, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, П.В. Білей // Науковий вісник УкрДІТУ : зб. наук.-техн. праць. – Сер.: Проблема деревообробного виробництва. – Львів : Вид-во УкрДІТУ. – 1994. – Вип. 2. – С. 29-39.
- Чудинов Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск : Изд-во "Наука", 1984. – 248 с.
- Аксельруд Г.А. Кинетика фильтрационного процесса сушки / Г.А. Аксельруд, Я.Н. Ханьк, В.И. Топчий // Химическая технология. – 1986. – № 5. – С. 41-46.
- Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали Механізм і кінетика фільтраційного сушіння / В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – К., 2007. – № 4. – С. 24-29.
- Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів у щільному шарі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 – Процеси і апарати хімічної технології / НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2003. – 20 с.

11. Никитин Е.Е. Концепция управления энергоэффективностью систем теплоснабжения поселенный / Е.Е. Никитин, Ин-т газа НАН Украины. – К. : Изд-во "Энерготехнологии и ресурсозбережение". – 2009. – № 2.

12. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов. – М. : Изд-во "Химия", 1988. – С. 352.

13. Рудобахта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М. : Изд-во "Химия", 1980. – С. 248.

#### Атаманюк В.М., Гумницький Я.М., Мосюк М.И. Кинетика внутриматричного процесса сушки измельченной "энергетической" вербы

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению коэффициента внутренней диффузии влаги из пор и капилляров частиц измельченной быстрорастущей "энергетической" вербы при фильтрационной сушке.

#### Atamanyuk V.M., Humnyuk Yu.M., Mosyuk M.I. Kinetics of internal diffusive process of drying of the ground up "power" willow

The results of theoretical and experimental studies to determine the coefficient of internal diffusion of moisture from the pores and capillaries of the diffusion of the crushed particles rapidly growing "energy" willow during the dry filtration.

УДК 621.548+311.24

Доц. Р.В. Зінько, канд. техн. наук –  
НУ "Львівська політехніка"

#### ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВІТРИЛЬНИХ З ЛОПАТЯМИ ВІТРИЛЬНОГО ТИПУ

Запропоновано класифікацію вітроподвигунів з урахуванням тенденцій їх розвитку. Проведено порівняння характеристик вітроподвигунів з лопатями гвинтового і вітрильного типу. Визначено потужність, яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі тиххідного вітроколеса вітрильного типу.

**Ключові слова:** лопаті вітрильного типу, автономні вітроенергетичні установки, класифікація, оптимізація профілю поверхні лопаті.

**Вступ.** Існування нашої цивілізації полягає в нагромадженні і перетворенні енергії за різних видів діяльності. Будь-яка діяльність людини є діяльністю економічною, оскільки економіка – це процес обміну між людьми порціями енергії або їх інформаційними віддзеркаленнями у вигляді так званої вартості, бо вартість – це інформація про витрачену на виробництво товару або послуги енергії. За останніх 30-35 років споживання енергії в світі подвоюється кожні 10 років, цим підтверджується, що науково-технічний і економічний розвиток – це, насамперед, розвиток енергетичний.

Зі зростанням величини переробленої енергії зростає валовий продукт, а брак енергії і неправильний її перерозподіл призводить до фінансових і економічних криз. Тому економічної стабільності можна досягти через науково-технічний розвиток, важливою складовою частиною якого є розвиток енергетичного комплексу.

Енергоспоживання, що збільшується, протягом останніх десятиліть задовольняється здебільшого завдяки використанню традиційних енергоносіїв – вугілля, нафти, газу, торфу, води (гідроенергетика) та атомної енергії. Швидке зростання енергоспоживання, паніка на ринках енергоносіїв у вигляді стрімкого здорожчання палива і енергії, посилення геополітичних, економічних і екологічних проблем паливно-енергетичного комплексу потребують більш обґрунтованого і ретельного опрацювання принципів використання