

## РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ МОРСЬКИХ СТОЯКІВ ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ, ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗШИРЕННЯ

<sup>1</sup>Б.В. Коней, <sup>2</sup>М.Г. Яриновський

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727146,  
e-mail: koreyb@iifnq.edu.ua

<sup>2</sup>CNGS Group, 95034, Крим, м. Сімферополь, вул. Куйбишева, 2, тел. (0652) 605950,  
e-mail: mykola.iarunovskiy@gmail.com

Пропонуються нові наукові результати та методи розрахунку міцності морських стояків, що перебувають під дією зовнішніх навантажень, внутрішнього тиску та температурного розширення. Для оптимізації розрахунку та отримання найбільш точних результатів використано комп'ютерну розрахункову програму Bentley AutoPIPE XM Edition, яка має необхідну сертифікацію та базується на методі кінцевих елементів. Внаслідок проведених розрахунків можна визначити оптимальну товщину труби, підібрати матеріал та вжити необхідних заходів щодо попередження критичних навантажень. Для акваторій, в яких існує імовірність виникнення льодових полів, ефективно використовувати метод встановлення стояків, коли вони не піддаються льодовим навантаженням (прокладання всередині кожухів чи опорних колон платформи).

Ключові слова: райзер, метод скінченних елементів, навантаження, температура, льодове поле, опорні колони

Предлагаются новые научные результаты и методы расчета прочности морских стояков при воздействии внешних нагрузок, внутреннего давления и температурного расширения. Для оптимизации расчета и получения наиболее точных результатов использована компьютерная расчетная программа Bentley AutoPIPE XM Edition, имеющая необходимую сертификацию и базирующаяся на методе конечных элементов. В результате проведенных расчетов можно определить оптимальную толщину трубы, подобрать материал и принять необходимые меры по предотвращению критических нагрузок. Для акваторий, в которых существует вероятность возникновения льдов, эффективно использовать метод установки стоек, когда они не подвергаются льдовым нагрузкам (прокладки внутри кожухов или опорных колонн платформы).

Ключевые слова: райзер, метод конечных элементов, нагрузки, температура, льдовое поле, опорные колонны

The article deals with new scientific results and methods of calculating the strength of marine risers by the action of external loads, internal pressure and thermal expansion. To optimize the calculation, and obtain the most accurate results, a computer program Bentley AutoPIPE XM Edition, which has the necessary certification and is based on the finite element method was used. As a result of the calculations we can determine the optimal thickness of the pipe and select the material and take the necessary measures to prevent critical loads. For areas where there is a probability of ice fields the method is efficiently used for risers installation when they are not subjected to ice loads (laying them inside casings or supporting columns of platforms).

Keywords: riser, finite element method, load, temperature, ice field, supporting columns

### Вступ

Світовий видобуток енергоносіїв все активніше переміщується на морський і океанічний шельфи. У 2010 році частка ресурсів, які видобувалися на шельфі, перевищила 50% від їх загальної кількості, і надалі ця цифра зростатиме.

Державне акціонерне товариство ДАТ «Чорноморнафтогаз», яке є монополістом у видобутку вуглеводнів з українського шельфу Чорного і Азовського морів, оприлюднило програму розвитку до 2015 року. В ній зокрема зазначається, що впродовж трьох найближчих років компанія планує освоїти 7 нових і дооблаштувати 2 діючих родовищ і, відповідно, утричі збільшити видобуток [1,2].

Для реалізації цих планів планується побудова нових морських нафтогазових платформ:

блок-кондукторів, житлових платформ, центрально-технологічних платформ і т.д.

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

При аналізі світового досвіду був вибраний регіон Каспійського моря, де характерні подібні кліматичні умови, а також, де описана нижче методика була впроваджена і випробувана часом.

Вказана методика розрахунку морських стояків була впроваджена на морських райзерних платформах Блок-1 і Блок-4, встановлених на родовищі Жданов на шельфі Туркменістану. Інжиніринг, закупівлю обладнання, будівництво і встановлення вказаних платформ здійснила компанія "CNGS Engineering".

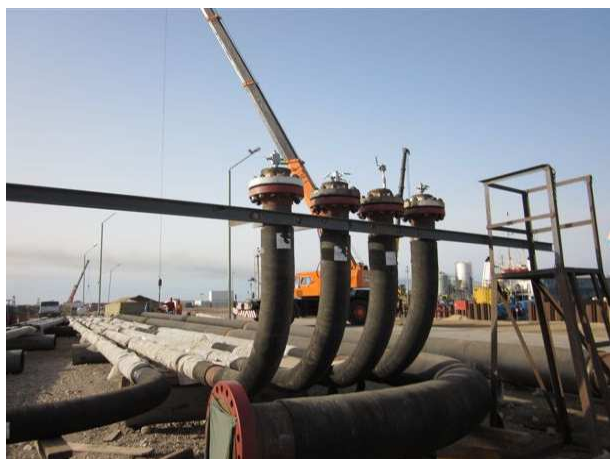


Рисунок 1 – Зварювання секції стояка на будівельному майданчику

### Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Незважаючи на швидкі темпи розвитку морських технологій на українському шельфі, невіршеними залишаються проблеми з обранням оптимальних конструкцій споруд, підбір обладнання для наявних метеорологічних умов регіону, вибір методик розрахунку навантажень на споруди та ін.

У зв'язку з плановим переходом до видобування вуглеводнів на більших глибинах, загострюються проблеми розрахунку морських стояків. Це пояснюється кількістю та величиною навантажень, які необхідно враховувати під час проведення розрахунків, метеорологічними характеристиками регіону, а саме, шквальними вітрами та імовірністю виникнення льодових навантажень, а також екологічними ризиками.

### Постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються

Використовуючи найбільш ефективну інженерну світову практику, запропонувати методику для розрахунку морських стояків, що перебувають під дією зовнішніх навантажень, внутрішнього тиску та температурного розширення. Для оптимізації розрахунку, а також отримання найбільш точних результатів слід використати комп'ютерну розрахункову програму, яка має необхідну сертифікацію та базується на методі кінцевих елементів.

### Основний матеріал дослідження. Методика розрахунку.

За основу розрахунку взято стандарт DNV-OS-F101 «Підводні трубопровідні системи» («Submarine Pipeline Systems»)[3].

Для морських трубопроводах повинні виконуватись такі умови дії механічних навантажень:

$$\sigma_e \leq \eta \cdot f_y ; \quad (1)$$

$$\sigma_l \leq \eta \cdot f_y , \quad (2)$$

де  $\sigma_e$  – еквівалентне навантаження за Фон Мізесом



Рисунок 2 – Монтаж морського стояка в морі

$$\sigma_e \leq \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \sigma_l + 3\tau_{hl}^2} ; \quad (3)$$

$\sigma_h$  – кільцеве навантаження

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D - t_2}{2t_2} ; \quad (4)$$

$\sigma_l$  – поздовжнє навантаження

$$\sigma_l = \frac{N}{\pi \cdot (D - t_2) \cdot t_2} + \frac{M}{\frac{\pi \cdot (D^4 - (D - 2 \cdot t_2)^4)}{32 \cdot D}} ; \quad (5)$$

$\eta$  – коефіцієнт використання труби (відповідно табл.5-14, DNV-OS-F101);

$N$  – поздовжня сила;

$M$  – згинальний момент;

$D$  – зовнішній діаметр труби;

$t_2$  – товщина стінки труби;

$f_y$  – межа плинності матеріалу;

$\tau_{hl}$  – тангенціальне напруження зсуву.

### Використані програмні комплекси і розрахункові методи

Розрахунок напружень від зовнішнього впливу на стояки проводиться з урахуванням усіх діючих навантажень на стояк. Враховується збільшення діаметра стояка від температурного розширення, а також враховується ефект тертя в опорах. Розрахунок впливу зовнішніх факторів проводиться з урахуванням виникнення шторму із ймовірністю 1% і різних значень швидкостей вітру і течій. Розрахунок напружень від внутрішнього тиску і зовнішніх впливів з урахуванням вагових, температурних навантажень та ефекту тертя проводиться в програмному комплексі Bentley AutoPIPE XM Edition.

### Принцип проведення розрахунку

Розрахунок полягає у визначенні величини всіх можливих діючих навантажень на вертикальну частину морського стояка з метою підтвердження правильності вибору його характеристик і місць закріплень при впливі на нього факторів навколишнього середовища. Розрахунок зовнішніх впливів зводиться до визначення

Таблиця 1 – Основні комбінації навантажень

North	Gr (Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W1(Навантаження від дії вітру з північного напрямку) +U1 (Навантаження від дії хвиль і течій з північного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
North-East	Gr (Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W2(Навантаження від дії вітру з північно-східного напрямку) +U2 (Навантаження від дії хвиль і течій з північно-східного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
East	Gr (Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W3(Навантаження від дії вітру з східного напрямку) +U3 (Навантаження від дії хвиль і течій зі східного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
South-East	Gr(Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W4(Навантаження від дії вітру з південно-східного напрямку) +U4 (Навантаження від дії хвиль і течій з південно-східного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
South	Gr(Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W5(Навантаження від дії вітру з південного напрямку) +U5 (Навантаження від дії хвиль і течій з південного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
South-West	Gr(Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W6(Навантаження від дії вітру з південно-західного напрямку)+U6(Навантаження від дії хвиль і течій з південно-західного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
West	Gr(Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W7(Навантаження від дії вітру із західного напрямку) +U7 (Навантаження від дії хвиль і течій західного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)
North-West	Gr(Навантаження, створене силами гравітації)+PT3(Навантаження від дії внутрішнього тиску і температури)+W8(Навантаження від дії вітру з північно-західного напрямку)+U8(Навантаження від дії хвиль і течій північно-західного напрямку із врахуванням впливу додаткової маси внаслідок обростання мікроорганізмами)

сумарного розподіленого навантаження на вертикальну ділянку стояка. Для розрахунку приймається максимальна хвиля і швидкості течій, характерні для шторму з імовірністю 1% за напрямками 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°.

Швидкість тривалого вітру приймається для розрахунку як максимальне усереднене на 10 хвилин значення швидкостей вітру, очікуваних протягом періоду, рівного 100 рокам.

Основними розрахунковими комбінаціями навантажень при розрахунку є навантаження, що діють в одному напрямку з півночі, північного сходу, сходу, південного сходу, півдня, південного заходу, заходу і північного заходу (табл. 1). Коефіцієнти безпеки необхідно вжити згідно з [ 3 ] і вони представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти запасу міцності

Навантаження	Коефіцієнт запасу міцності
Внутрішній тиск	1.2
Температура	1.2
Вага	1.2
Вітер, хвилі і течії	1.05

### Результати розрахунку

Для розрахунку навантажень на стояки в програмному комплексі Bentley AutoPIPE XM Edition створювалися просторові розрахункові моделі стояків. Типова модель стояка трубопроводу представлена на рисунку 3.

Розрахунки проводилися для умов максимального шторму із імовірністю 1% в 100 років. Величини навантажень від впливу зовнішнього середовища розраховувалися автоматично в програмному комплексі Bentley AutoPIPE XM Edition.

В результаті обробки даних в програмному комплексі Bentley AutoPIPE XM Edition створюються комбінації навантажень на стояк. Розподіли напружень по довжині стояків платформи Блок-1 (родовище Жданов, Каспійське море) наведені на рисунках 4, 5.

Як видно з графічних результатів розрахунку, максимальні сумарні навантаження виникають в місцях змінного змочування і у відводах стояків трубопроводів.

В результаті проведених розрахунків отримуємо навантаження за категоріями:

- Ноор – варіанти комбінацій, для яких обчислюються кільцеві навантаження;



Рисунок 3 – Просторова розрахункова модель стояка

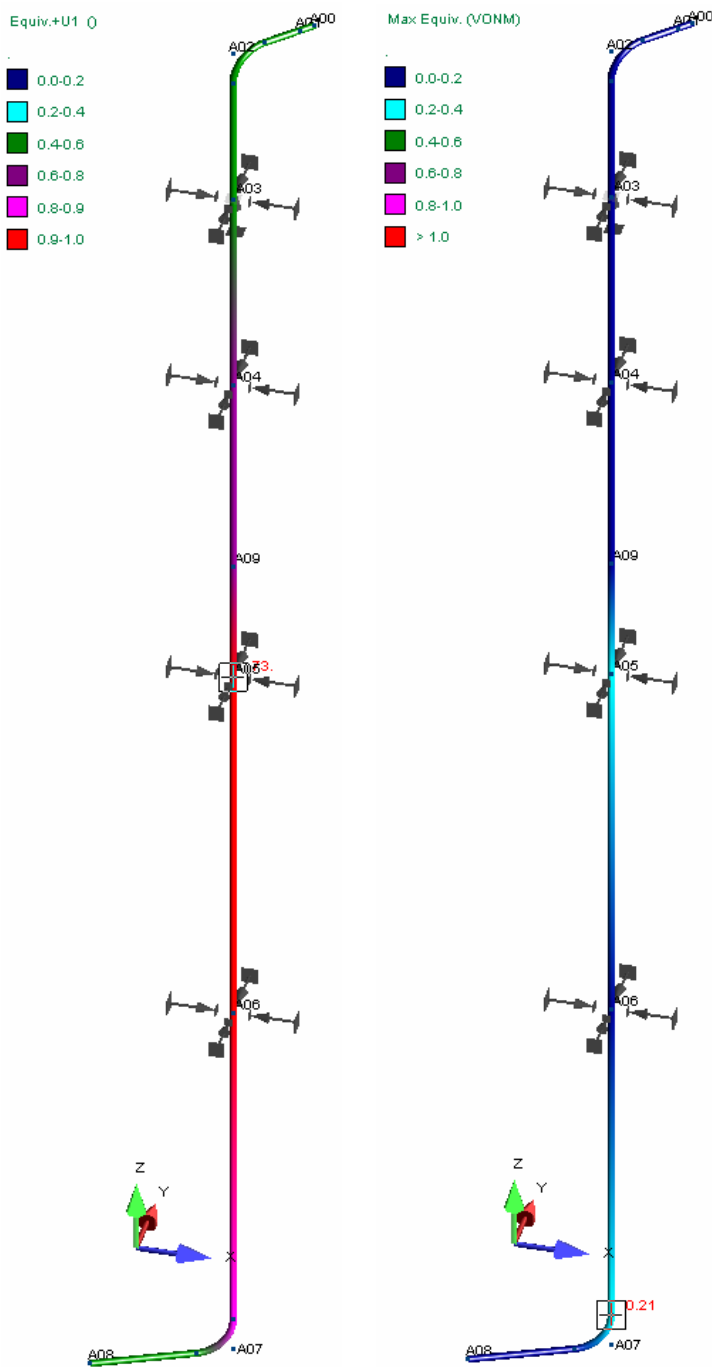


Рисунок 4 – Сумарне навантаження в стояку за методикою DNV-OS-F101, МПа·10<sup>-3</sup>

Рисунок 5 – Відношення між сумарними і допустимими навантаженнями за методикою DNV-OS-F101

- Von Mises – варіанти комбінацій, для яких обчислюються навантаження за Мізесом (навантаження не порівнюються з допустимими);
- Combined – нормативні (комбіновані) навантаження обчислюються з урахуванням температурних деформацій, поздовжніх напружень від тиску і напружень від згину внаслідок спільної дії тривалих і короточасних навантажень;

- Occasion (гідровипробування) – нормативні навантаження, які обчислюються у відповідності з процедурами для короточасних навантажень.

#### Проведення перевірного розрахунку

Для порівняння отриманих даних, розрахованих за методикою стандарту DNV-OS-F101 «Підводні трубопровідні системи», доцільно провести перевірений розрахунок за методикою стандарту ASME B 31.4 «Трубопровідні систе-

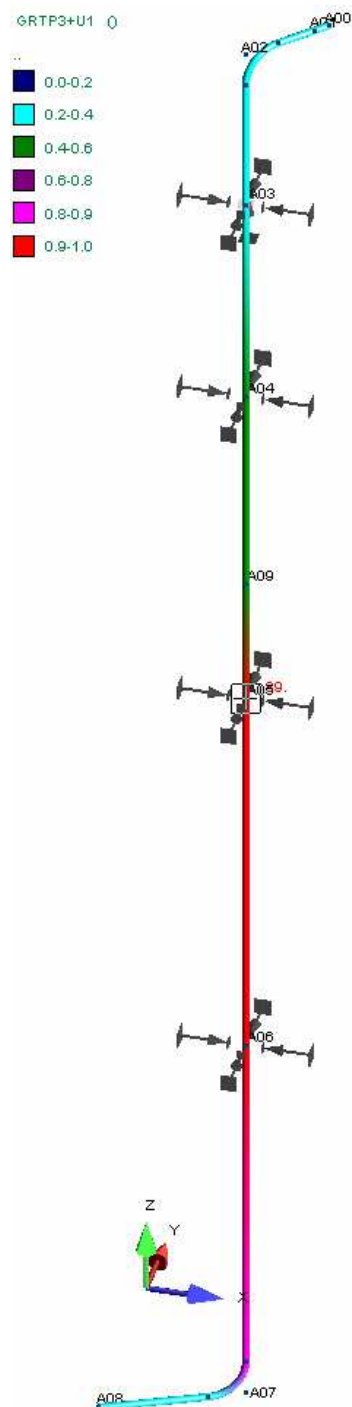


Рисунок 6 – Сумарне навантаження в стояку за методикою ASME B31.4, МПа·10<sup>-3</sup>

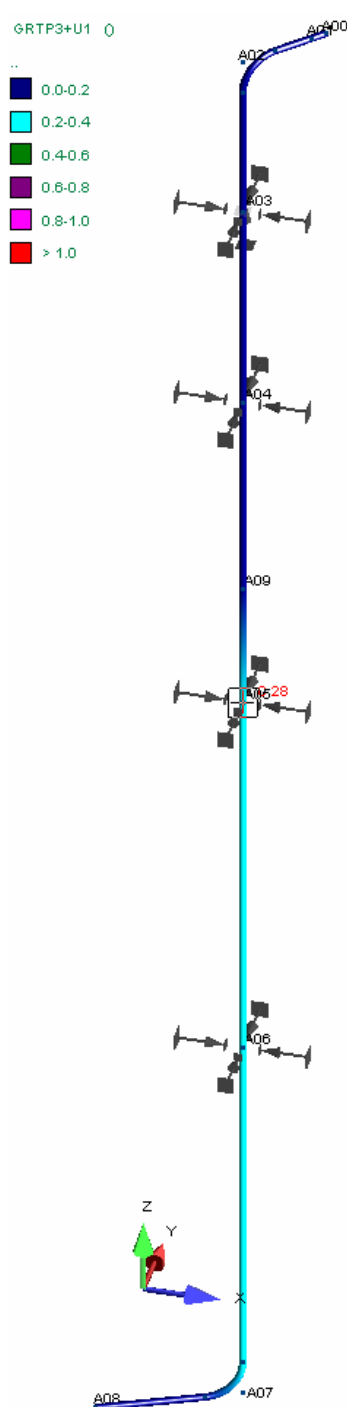


Рисунок 7 – Відношення між сумарними і допустимими навантаженнями за методикою ASME B31.4

ми для транспортування рідких вуглеводнів і інших рідин» ("Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids")[4].

Методика розрахунку за стандартом ASME В 31.4 передбачає оцінку міцності стояків підводних трубопроводів за такими напруженнями:

- Величину кільцевого навантаження слід обчислювати на основі різниці між внутрішнім і зовнішнім тисками та перевіряти на відповідність нерівностям, наведеним нижче:

$$S_h \leq F_1(S_y); \quad (6)$$

$$S_h = (P_i - P_e) \frac{D}{2t}; \quad (7)$$

- Поздовжнє навантаження має відповідати нерівності:

$$|S_L| \leq F_2(S_y);$$

- Сумарне навантаження має відповідати нерівності:



Рисунок 8 – Платформа Блок-1 в Каспійському морі



Рисунок 9 – Просторова 3D модель платформи Блок-1

$$2 \sqrt{\left(\frac{S_L - S_h}{2}\right)^2 + S_t^2} \leq F_3(S_y). \quad (8)$$

Графічні результати перевірних розрахунків за методикою ASME В 31.4 зображені на рисунках 6, 7.

Розрахунок за методикою стандарту ASME В 31.4 "Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids" аналогічно методиці розрахунку за стандартом DNV-OS-F101 «SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS» показує, що максимальні сумарні напруження виникають у відводах стояків і в зоні змінного змочування.

#### Висновки

Запропонована методика може бути успішно використана для проектування морських платформ, споруджуваних на українських шельфах Чорного і Азовського морів [7]. Описана методика була впроваджена в Каспійському регіоні (рис. 8, 9) і довела свою ефективність [5,6]. Внаслідок проведених розрахунків в подальшому можна визначити оптимальну товщину труби, підібрати матеріал та вжити необхідних заходів щодо попередження критичних навантажень.

Для акваторій, в яких існує імовірність виникнення льодових полів, ефективним є використання методу встановлення стояків, що не піддаються льодовим навантаженням (прокладання всередині кожухів чи опорних колон платформи).

#### Література

- 1 Гідрометеорологічні характеристики Азовського моря по статистичним даним льодових умов / О.В. Хотнянська, В.П. Сінцов, С.О. Овецький, М.Г. Яриновський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 3 (32). – С. 59-65.
- 2 Енергетична безпека України в Чорноморському регіоні. Аналітична доповідь / О.Л. Михайлюк, О.Є. Калашникова; за ред. О.О. Воловича. – Одеса: Фенікс, 2011. – 55 с.
- 3 Стандарт DNV-OS-F101 «Підводні трубопровідні системи» («Submarine Pipeline Systems»). – 64 с.
- 4 Стандарт ASME В 31.4 «Трубопровідні системи для транспортування рідких вуглеводнів і інших рідин» ("Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids") – 72 с.
- 5 Інтернет-ресурс [www.blackseagas.com](http://www.blackseagas.com) – офіційний веб-сайт ДАТ «Чорноморнафтогаз».
- 6 Інтернет-ресурс [www.cngsgroup.com](http://www.cngsgroup.com) – офіційний веб-сайт компанії "CNGS Engineering".
- 7 Копей Б.В. Аналіз конструкцій морських бурових та експлуатаційних платформ типу SPAR / Копей Б.В., Жиліна О. В. // Буріння. – 2010. – № 1,2(5). – С. 26-29.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
13.02.13

Рекомендована до друку  
професором **Івасівим В.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Хоминцем З.Д.**  
(ТЗОВ «СМПП-сервіс», м. Івано-Франківськ)