

УДК 681.519:622.276

С.В. Гавришук, В.М. Юрчишин, В.М. Краєцький

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЗАВОДНЕННЯ НАФТОВОГО ПОКЛАДУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКО-ЛІНГВІСТИЧНОЇ МОДЕЛІ**

Розглянуто задачу вибору способу розташування водонагнітальних та видобувних свердловин при заводненні нафтового покладу. Запропоновано методологію оптимізації процесу прийняття рішення з використанням нечіткого підходу до формалізації знань у заданій предметній області. Описано структуру та функціональні можливості створеного програмного продукту, що дозволяє оцінювати ефективність впровадження найбільш поширених систем заводнення нафтових покладів відповідно до заданих користувачем даних геолого-технологічної характеристики покладу.

*Ключові слова:* заводнення нафтового родовища, система заводнення, система підтримки прийняття рішень, моделювання знань, лінгвістична змінна, нечітка база знань.

Рассмотрена задача выбора способа расположения нагнетательных и добывающих скважин при заводнении нефтяной залежи. Предложена методология оптимизации процесса принятия решения с использованием нечеткого подхода к формализации знаний в заданной предметной области. Описана структура и функциональные возможности программного продукта, позволяющего оценивать эффективность внедрения наиболее распространенных систем заводнения нефтяных залежей в соответствии с заданными пользователем данными геолого-технологической характеристики залежи.

*Ключевые слова:* заводнение нефтяного месторождения, система заводнения, система поддержки принятия решений, моделирование знаний, лингвистическая переменная, нечеткая база знаний.

An approach how to locate injection and production wells in oil deposits during waterflooding is considered. An optimizing methodology of decision-making based on fuzzy approach to formalization of knowledge in the subject area is offered. A created software allows to evaluate the efficiency of the most widespread flooding pattern types according to geological and technological characteristics of the deposit.

*Keywords: waterflooding, injection pattern, decision making, knowledge base, intellectual information system, linguistic variable, fuzzy sets.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Процес заводнення є одним із головних методів впливу на нафтові поклади з метою підтримки пластового тиску для підвищення нафтовіддачі пластів [1]. У процесі його реалізації тиск води, який витісняє нафту, створюють її запомповуванням з поверхні через систему нагнітальних свердловин. Обрана система розташування свердловин може бути ефективною при одних геолого-фізичних параметрах системи «пласт-вуглеводні» і збитковою при інших. Задача розміщення свердловин по площі покладу в процесі його заводнення вимагає врахування багатьох критеріїв, додатковими обмеженнями до яких можуть бути особливості підземної гідромеханіки, питання буріння і спорудження свердловин та наземних споруд, крім того, завдання може ускладнюватися геологічною та економічною невизначеністю. Невизначеність інформації про нафтогазовий об'єкт обумовлена комплексом причин, головною з яких є унікальність кожного об'єкта, його масштабність, скритність, а також складність внутрішньої будови [2]. Робота зі складними системами призводить до зростання ризиків від прийняття неефективних рішень, результатом чого можуть бути негативні економічні та технічні чи соціальні наслідки. За обмежений час проєктувальникам необхідно проаналізувати множину можливих варіантів систем розробки нафтового покладу із заводненням з різною конфігурацією нагнітальних та видобувних свердловин, виконуючи при цьому численні розрахунки. Використання сучасних інформаційних технологій дає можливість скоротити час розробки проєктів, зменшити трудові затрати та підвищити якість прийнятих рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день існує велика кількість досліджень, присвячених проблемі автоматизації вибору раціонального розміщення свердловин при вилученні нафти. Огляд розроблених інформаційних систем та технологій зроблено у [3; 4]. Існуючі програмні продукти орієнтовані, головним чином, на гідродинамічне моделювання роботи покладу та підрахунок характеристик системи видобування вуглеводнів при заданих координатах забою свердловин. З метою зменшення кількості запусків стимулятора вирішуються оптимізаційні задачі з використанням алгоритмів випадкового пошуку, еволюційних підходів, крекінгу, нейрон-нечітких технологій та ін. Питання

невизначеності у системах прийняття рішень компенсують за допомогою різноманітних методик штучного інтелекту. Такі підходи ґрунтуються на нечітких множинах і застосуванні лінгвістичних величин та висловлювань для опису стратегій прийняття рішень [5–7]. Особливо актуальним цей підхід є при розв’язанні завдання раціонального розміщення свердловин методом спрямованого перебору серед різних варіантів. У такому випадку сформований набір правил акумулює в собі знання та досвід експертів нафтової галузі. Використання теорії нечітких множин у задачах вибору способу взаємного розташування видобувних та нагнітальних свердловин може бути корисним тоді, коли параметри родовища незначною мірою відрізняються від критеріїв ефективності тієї чи іншої системи заводнення, а деякі системи розташування свердловин мають загальну зону застосування по цілому ряду параметрів.

**Постановка цілей статті.** Представимо задачу вибору системи заводнення нафтового покладу на формальному рівні наступним чином. Нехай задано множину альтернативних варіантів розробки нафтового покладу із заводненням залежно від схеми взаємного розміщення водонагнітальних та видобувних свердловин  $Z = \{z_i : i = \overline{1; m}\}$  та множину геолого-технологічних критеріїв  $G = \{g_l : l = \overline{1; n}\}$  для оцінки альтернатив. Необхідно визначити множину найкращих альтернатив (множина може складатися з одної альтернативи), оптимальних за ступенем їх ефективності впровадження в заданих геологічних умовах покладу.

**Метою** даного дослідження є розроблення методології вибору системи заводнення нафтового покладу на основі нечіткого підходу до формалізації знань та проектування відповідної інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

**Основний матеріал.** Для вирішення поставленої задачі опишемо формально-логічні дослідження для побудови конструкцій представлення та використання знань про технологічний процес заводнення нафтових покладів. Вибір системи заводнення нафтового покладу представимо у вигляді об’єкта з  $n$  входами та одним виходом виду [8]:

$$Z = f_z(x_j)_{j=1}^n,$$

де  $Z$  – вихідна змінна;  $x_j$  – вхідні змінні. Для розв’язання задачі потрібно на основі інформації про вектор входів  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$

визначити вихід  $z \in Z$ . Вхідні та вихідна змінна розглядаються у вигляді лінгвістичних змінних відповідно. Універсальні множини, на яких задаються лінгвістичні змінні, представлено: для кількісних змінних – через область зміни, для якісних – як множину можливих значень. Для оцінки лінгвістичних змінних будемо використовувати нечіткі терм-множини  $T = \{a_t : t = \overline{1, k}\}$ , де  $k$  – кількість термів лінгвістичної змінної.

У ході проведених досліджень розглянуто 8 альтернативних варіантів розробки нафтового покладу із заводненням залежно від взаємного розташування водонагнітальних та видобувних свердловин [9]. Вихідна змінна  $Z =$  «Системи заводнення» визначена на універсальній множині  $U = [5\text{-точкова, 7-точкова, 9-точкова, 5-рядна, 3-рядна, 1-рядна, приконтурна, законтурна}]$  (рис.1). Загалом, розглянуті схеми розміщення свердловин є лише частиною з великої кількості способів організації заводнення на нафтовому родовищі, проте їх широке застосування протягом уже тривалого часу дозволяє виділити основні закономірності доцільності і ефективності їх впровадження.

Вхідні змінні  $x_1 \dots x_n$  характеризують геолого-технологічні показники, що мають найбільший вплив на вибір заданих систем заводнення:

$x_1$  – *проникність колектора* – основний фільтруючий параметр гірської породи, що характеризує її здатність пропускати через себе рідини при перепаді тиску. Видобувні можливості свердловин і пласта та його продуктивність залежать від величини проникності;

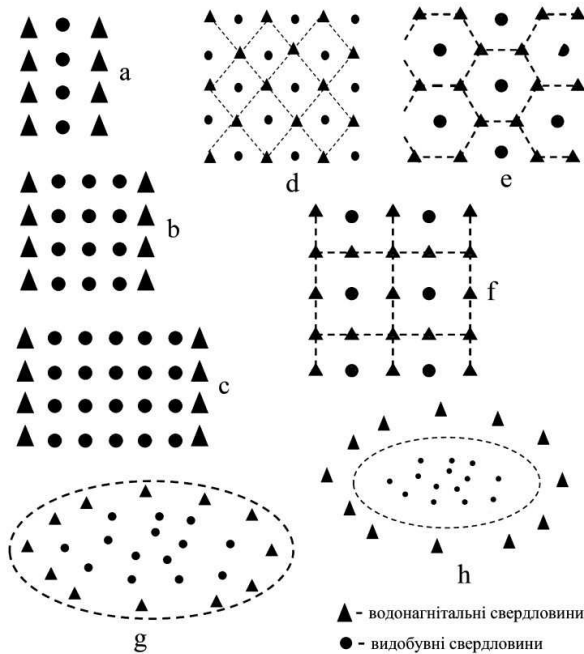
$x_2$  – *коефіцієнт піскуватості пласта* – це відношення об'єму пористої частини пласта до всього об'єму пласта в межах його продуктивної частини;

$x_3$  – *неоднорідність пластів по проникності* – непостійність чисельних значень проникності пласта по площі і по розрізу;

$x_4$  – *розчленованість розрізу продуктивного горизонту на пласти-колектори*, викликана чергуванням їх з непроникними пластами, кількість яких у межах покладу часто непостійна внаслідок неповсюдного залягання проникних і непроникних порід і зменшення нафтогазонасиченої товщини в периферійній зоні покладу;

$x_5$  – *спрямованість тріщинуватості* – особливість будови пластів, що полягає у певній лінійній спрямованості тріщин. Розміщуючи ряди

нагнітальних свердловин паралельно протяжності тріщин, можна значно збільшити площу охоплення заводненням;



**Рисунок 1 – Системи розробки нафтових покладів із заводненням:**

a – однорядна; b – трирядна; c – п’ятирядна; d – п’ятиточкова;  
e – семиточкова; f – дев’ятиточкова; g – приконтурна; h – законтурна

$x_6$  – співвідношення динамічних коефіцієнтів в’язкостей нафти і води — показник, що характеризує темпи обводнення свердловин. Чим він більший, тим гірші умови вилучення нафти з покладу із застосуванням різних видів заводнення;

$x_7$  – ефективна нафтонасичена товщина пласта – сумарна товщина насичених нафтою прошарків порід-колекторів у пласті;

$x_8$  – гідропровідність пласта – здатність пласта-колектора пропускати крізь себе рідину, яка насичує його пори;

$x_9$  – площа покладу;

$x_{10}$  – кількість пластів в експлуатаційному об’єкті. В об’єкт розробки може бути включений один, кілька, або всі пласти родовища;

$x_{11}$  – продуктивність свердловини характеризує можливості пласта віддавати флюїди. При високій продуктивності пластів ступінь мінливості колекторських властивостей по площі найменша, що забезпечує рівномірне переміщення фронту витіснення.

Для оцінки вихідної змінної  $Z$  кожній із вхідних змінних  $x_1..x_{11}$  поставлено у відповідність лінгвістичну змінну та визначено її нечіткі терм-множини (табл. 1).

Таблиця 1

### Терм-множини лінгвістичних змінних

Лінгвістична змінна	Терм-множини
Розмір покладу ( $X_1$ )	Малий ( $a_{11}$ ), значний ( $a_{12}$ ), великий ( $a_{13}$ )
Товщина ( $X_2$ )	Мала ( $a_{21}$ ), середня ( $a_{22}$ ), велика ( $a_{23}$ )
Піскуватість ( $X_3$ )	Низька ( $a_{31}$ ), висока ( $a_{32}$ )
Пористість ( $X_4$ )	Невелика ( $a_{41}$ ), середня ( $a_{42}$ ), велика ( $a_{43}$ )
Розчленованість ( $X_5$ )	Слабка ( $a_{51}$ ), значна ( $a_{52}$ ), висока ( $a_{53}$ )
Неоднорідність ( $X_6$ )	Однорідний ( $a_{61}$ ), неоднорідний ( $a_{62}$ )
Спрямованість тріщин ( $X_7$ )	Невиражена ( $a_{71}$ ), виражена ( $a_{72}$ )
Співвідношення в'язкостей ( $X_8$ )	Невисоке ( $a_{81}$ ), значне ( $a_{82}$ ), високе ( $a_{83}$ )
Кількість пластів ( $X_9$ )	Мала ( $a_{91}$ ), невелика ( $a_{92}$ ), велика ( $a_{93}$ )
Продуктивність ( $X_{10}$ )	Низька ( $a_{101}$ ), середня ( $a_{102}$ ), Висока ( $a_{103}$ )
Гідропровідність ( $X_{11}$ )	Низька ( $a_{111}$ ), середня ( $a_{112}$ ), Висока ( $a_{113}$ )
Системи заводнення ( $Z$ )	5-точкова ( $z_1$ ), 7-точкова ( $z_2$ ), 9-точкова ( $z_3$ ), 5-рядна ( $z_4$ ), 3-рядна ( $z_5$ ), 1-рядна ( $z_6$ ), приконтурна ( $z_7$ ), законтурна ( $z_8$ )

Альтернативам  $z_i \in Z$  задано функції належності  $\mu_{ij}$  ( $j = \overline{1, n}$ ,  $n$  – кількість критеріїв оцінки) нечітким множинам лінгвістичних змінних, що виражають ефективні інтервали значень геолого–технологічних параметрів для успішного впровадження тієї чи іншої системи заводнення. Функція належності інтерпретується як суб'єктивна міра та являє собою відображення  $\mu_{ij} \rightarrow [0..1]$ .

Використання нечіткого підходу дозволяє відійти від жорстких границь критеріїв, та враховувати деякий перехідний інтервал значень параметрів. Досліджуваним параметрам покладу, значення яких потрапляють у перехідний інтервал, присвоюється нижче значення ступенів належності ефективним інтервалам застосування тієї чи іншої системи заводнення.

Проведені дослідження дозволили сформувати набір правил, де в якості умов і висновків використовуються нечіткі висловлювання з вибору системи заводнення нафтового покладу, які було формалізовано на основі нечіткого підходу з використанням лінгвістичних змінних. Приклад відповідної логіко-лінгвістичної моделі подано у вигляді матриці знань у табл. 2.

Таблиця 2

**Матриця знань з вибору системи заводнення нафтового покладу**

ЯКЩО											Т О	
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$Z$	
–	$a_{21}$	$a_{31}$	$a_{41}$	$a_{51}$	$a_{62}$	$a_{71}$	$a_{83}$	$a_{91}$	$a_{101}$	$a_{111}$	$z_1$	
⋮												
	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{31}$	$a_{41}$	$a_{53}$	$a_{62}$	$a_{72}$	$a_{83}$	$a_{93}$	$a_{101}$	$a_{111}$	$z_7$
	$a_{11}$	$a_{23}$	$a_{32}$	$a_{43}$	$a_{53}$	$a_{61}$	$a_{71}$	$a_{81}$	$a_{92}$	$a_{102}$	$a_{113}$	$z_8$

Тому правило «5-точкова площинна схема розташування свердловин застосовується, в основному, для розробки

низькопродуктивних, з низькою гідропровідністю, сильно неоднорідних по проникності, невеликою піскуватістю і слабкою розчленованістю покладів» можна формалізувати наступними чином:

ЯКЩО

$$X_{10} \in a_{101} \text{ I } X_{11} \in a_{111} \text{ I } X_6 \in a_{62} \text{ I } X_3 \in a_{31} \text{ I } X_5 \in a_{51} \quad (1)$$

ТО  $Z \in z_1$ .

Вибір рішення  $z^* \in Z = \{z_1, \dots, z_m\}$  для вектора вхідних змінних  $X = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  будемо наступними чином:

1. Вектор вхідних змінних  $X = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  порівнюємо з вектором функцій належності  $\mu_i^{z_i} = \langle \mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ij} \rangle, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$  матриці знань для обчислення ступенів належності  $c_{ij}$  вхідних даних ефективним інтервалам значень критеріїв альтернативи  $z_i$ .

2. Для кожного вектора оцінок  $C_i = \langle c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ij} \rangle$  обчислюємо результуючий показник:

$$\overline{c}_i = \min[c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ij}] = c_{i1} \wedge c_{i2} \wedge \dots \wedge c_{ij} \quad (2)$$

3. Визначаємо значення вихідної змінної  $z^*$ , результуючий показник  $\overline{c}_i$  якої має максимальне значення:

$$\overline{c} = \max[\overline{c}_1, \overline{c}_2, \dots, \overline{c}_m] = \overline{c}_1 \vee \overline{c}_2 \vee \dots \vee \overline{c}_m \quad (3)$$

Таким чином, співвідношення (1), що встановлює зв'язок між вхідними параметрами  $x_1 \dots x_n$  та вихідною змінною  $Z$ , формалізовано шляхом використання нечітких лінгвістичних висловлювань виду (2) на основі запропонованої матриці знань. Альтернатива, що відповідає знайденому значенню вихідної змінної, є рішенням задачі для вектора вхідних змінних  $X = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ , оскільки її характеристики максимально відповідають ефективним інтервалам значень критеріїв для успішного впровадження тієї чи іншої системи заводнення.

Розглянутий підхід використано при проектуванні програмного забезпечення для підтримки прийняття рішень щодо вибору схеми взаємного розташування водонагнітальних та видобувних свердловин при заводненні нафтових покладів. FloodingPattern є веб-орієнтованою аплікацією, що дозволяє оцінювати ефективність впровадження найбільш поширених у практиці розробки родовищ вуглеводнів



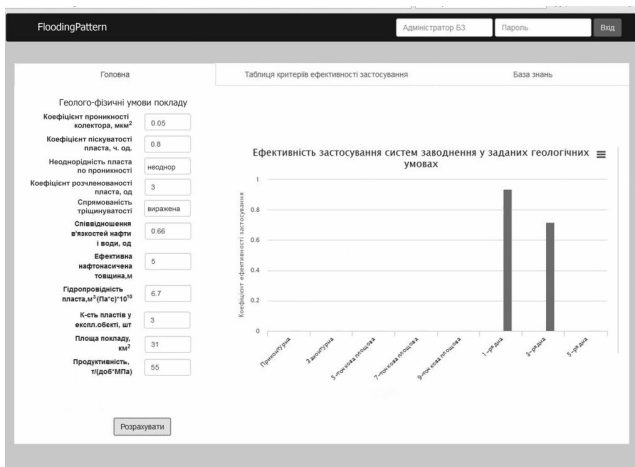
систем заводнення на основі інформації про геолого-фізичні характеристики покладу та властивості пластових флюїдів. Алгоритм процесу формування рішення при роботі з програмою представлено на рис. 2.



Рисунок 2 – Процес формування рішення при роботі з FloodingPattern

У структуру інформаційної системи входять чотири основні модулі: *підсистема взаємодії з користувачем* (забезпечує роботу з програмою у режимі користувача чи адміністратора бази знань); *підсистема генерації рішення* (визначає ефективність впровадження систем заводнення, інформація про які міститься в базі знань, на основі введених користувачем даних); *підсистема набуття знань* (дозволяє вносити в базу знань чи коригувати правила з вибору системи заводнення по мірі нагромадження досвіду розробки нафтових родовищ та налаштовувати параметри функцій належності нечітких змінних критеріїв), *підсистема контролю адекватності рішення* (дозволяє здійснювати перевірку генерованого системою рішення, переглянувши проміжні значення розрахунків за кожним із критеріїв у вкладці "Таблиця ефективності застосування" чи користавшись допоміжною базою знань).

Результати роботи інформаційної системи відображаються на екрані у вигляді стовпцевої діаграми на головній сторінці проекту, куди виводяться розраховані значення коефіцієнтів ефективності застосування кожної з систем заводнення при заданих вхідних значеннях геолого-фізичних умов покладу та технологічних параметрів розробки (рис. 3).



**Рисунок 3 – Головна сторінка інформаційної системи FloodingPattern**

У випадку близьких значень коефіцієнтів застосовності, до аналізу залучаються критерії, що не піддаються формалізованому кількісному оцінюванню – підказки та обмеження, які знаходяться в допоміжній базі знань у вигляді правил лінгвістичного характеру.

FloodingPattern побудована за тривірвеневою архітектурою: клієнт – сервер – база даних. Клієнтська частина представляє собою HTML сторінку, побудовану за технологією Java Server Page з використанням бібліотек HighCharts та JQuery і css фреймворку Bootstrap. Серверна частина написана мовою Java та служить для обробки і передачі даних, необхідних клієнту. Взаємодія між клієнтською і серверною частиною відбувається з використанням технології RESTful Web Services. База даних написана мовою структурованих запитів SQL, містить 8 таблиць, зв'язаних між собою зв'язками у вигляді відношень між первинними і вторинними ключами. У базі даних зберігається інформація, якою оперує користувач при взаємодії із системою генерації рішень (таблиці parameters, results, intermediate,

intermediatetoflooding), матриця знань з вибору системи заводнення нафтового покладу (таблиці flooding, criteria, caption) та вектор функцій належності нечітких термів (таблиця therm\_set).

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Розроблена інформаційна система дозволяє зменшити кількість обчислень у процесі прийняття рішення щодо вибору системи заводнення нафтового покладу шляхом скорочення числа альтернативних варіантів до кількох, що є найбільш ефективними у заданих геологічних умовах. На даній стадії досліджень виконано етап структурної ідентифікації, що полягає у побудові моделі процесу генерації рішення з параметрами, що підлягають налагодженню. Подальші дослідження будуть спрямовані на уточнення форм функцій належності нечітких термів, з допомогою яких оцінюються входи та виходи інформаційної системи, шляхом аналізу статистичних даних розробки нафтових покладів із заводненням.

### Бібліографічні посилання

1. Довідник з нафтогазової справи / [за заг. ред. В.С. Бойка, Р.М. Кондрата, Р.С. Яремійчука]. – Львів: Місіонер, 1996. – 620 с.
2. **Юрчишин В. М.** Інформаційне моделювання нафтогазових об'єктів : [монографія] / В. М. Юрчишин, В. І. Шекета, О. В. Юрчишин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 192 с.
3. **Бурма С. В.** Аналіз використання інформаційних технологій при заводненні нафтових родовищ / С.В. Бурма, В.М. Юрчишин // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 5. – С. 48–49.
4. **Гавришук С. В.** Використання програмних засобів при управлінні процесом заводнення нафтових родовищ // Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики: матеріали XVI Всеукраїнської наук. конф. (8–9 жовтня 2009 р., Львів). – Л. : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. – С. 60–61.
5. **Гавришук С. В.** Застосування м'яких обчислень при розробці інформаційних технологій управління знаннями фахівців нафтогазової справи / С.В. Гавришук, В.М. Юрчишин // Сучасні засоби розроблення інформаційних систем: матеріали Міжнародної науково-практ. конф. (20–21 листопада 2008 р., Харків). – Х. : ХНЕУ, 2008. – № 15. – С. 144–145.
6. Фазі-логіка в системах керування : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 84 с.

7. **Алтунин А. Е.** Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : [монография] /А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень : Изд-во ТГУ, 2000. – 352 с.

8. **Ротштейн А. П.** Интеллектуальные технологии интенсификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница : Инверсия-Винница, 1999. – 320 с.

9. **Гаврищук С. В.** Концептуальний підхід до створення інформаційної системи підтримки прийняття рішень при заводненні нафтового родовища / С.В Гаврищук, Т.В. Дитко, В.М. Юрчишин // Научные труды SWorld. – Иваново : Научный мир, 2015. – № 2 (39), Т. 2. – С. 41–45.

*Надійшла до редколегії 27.10.15*