

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2018

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
постановою президії ВАК України
як наукове фахове видання
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ,
член-кор. НАН України

Відповідальний секретар
К. О. ГОРБУНОВ,
канд. техн. наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф., РХТУ Москва (Росія)*
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор F. Executive Co. (Великобританія)*
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon) ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина) та ун-та Манчестера (Великобританія)*
В. Плешу, *PhD, проф., ун-т POLITEHNICA Бухарест (Румунія)*
П. Стехлік, *PhD, проф., VUT Брно (Чехія)*
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*
П. А. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*
В. П. Шапоров, *д-р техн. наук, проф.*
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*
С. В. Яковлев, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*
П. О. Капустенко, *акад. Академії будівництва України*
О. П. Арсеньєва, *д-р техн. наук, доц.*

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щукіна Л. П., Болюх В. Ф., Лігезін С. Л.,
Захаров А. В., Противень О. С.
Вплив методу консолідації порошків
на фазоутворення технічної кераміки.....3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Дзевочко О. М., Подустов М. О.
Нові гофровані насадкові елементи для
використання в абсорбційних системах..... 8

Тесленко М. Г.
Автоматизація дослідження імерсійного
змочування методом визначення часу
протікання із використанням алгоритму
аналізу зображення 18

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Алексахин А. А., Ена С. В.,
Гордиенко Е. П., Сыров М. В.,
Фещенко Р. С.*
Особенности утепления групп зданий
при централизованном теплоснабжении....27

*Кравченко О. В., Суворова И. Г.,
Баранов И. А., Велигоцкий Д. А.*
Влияние водорода на течение и
теплообмен в системе
"трещина горной породы – флюид".....35

Хавин Г. Л., Хоу Чживень
Эффективность сверления
полимерных композиционных
материалов сверлами, отличными по
конструкции от спирального.....47

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Тихомирова Т. С., Філенко О. М.,
Шестопалов О. В., Горбунова О. В.,
Дуюн О. А.*
Досвід поєднання STEM та інклюзивної
освіти в літньому таборі на базі
технічного вищого навчального
закладу.....54

Затверджено Вченою радою НТУ «ХП» (протокол № 6 від 06.07.2018 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХП», 2018. – № 3. – 60 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій
різноманітних галузей промисловості.

УДК 666.3 : 621.3

Щукіна Л.П., Болюх В.Ф., Лігезін С.Л., Захаров А.В., Противень О.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ВПЛИВ МЕТОДУ КОНСОЛІДАЦІЇ ПОРОШКІВ НА ФАЗОУТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ КЕРАМІКИ

Ключові слова: кераміка, консолідації порошоків, імпульсне пресування, скло-фаза.

Вступ. Висока енергоємність технологічних процесів в керамічному виробництві спонукає до створення нових менш вартісних керамічних технологій, що вимагає пошуку інновацій і серед методів формування напівфабрикатів. Найпоширенішими методами формування в технології кераміки є пластичне формування керамічних мас, лиття шлікерів і напівсухе пресування порошоків. Останній метод з точки зору енергозбереження є найбільш доцільним, оскільки дозволяє виключити з технологічного циклу етап сушки напівфабрикатів, який в структурі витрат на виробництво становить 20 %. Ще однією перевагою напівсухого пресування є можливість використання непластичних порошоків і отримання напівфабрикатів з точними геометричними розмірами, що обумовлює його переважне застосування в технології технічної кераміки.

Останнім часом як ефективний метод консолідації порошоків розглядається імпульсне пресування, зокрема індукційно-динамічний метод, який використовується для компактування нанорозмірних порошоків при виготовленні прозорої кераміки та інших видів нанокераміки [1, 2], ультра- і середньодисперсних порошоків при виготовленні високотемпературної корундо-цирконієвої кераміки [3], композиційних матеріалів різного призначення [4, 5]. Індукційно-динамічний метод пресування здійснюється під дією імпульсних хвиль стиску з високою амплітудою до 5 ГПа, що забезпечує більшу густину напівфабрикатів у порівнянні зі статичними методами (до 95–98 % від теоретичної). В керамічних технологіях цей метод формування може розглядатися як резерв енергозбереження, оскільки під час такого імпульсного стискання порошку поряд з деформацією та руйнуванням його часток відбувається локальний імпульсний нагрів, що в сукупності надасть змоги стимулювати структурно-фазові перетворення при подальшому спіканні кераміки.

Мета роботи полягала в дослідженні впливу індукційно-динамічного методу пресування на процеси фазоутворення при отриманні технічної кераміки та оцінці можливостей енергозбереження при використанні даного методу.

Матеріали та методика досліджень. Як об'єкт досліджень були використані дисперсні сировинні порошки з розміром часток менше 63 мкм, які містили тонкомелений кварцовий пісок з вмістом 99,0 мас. % SiO_2 , технічний глинозем з вмістом 99,2 мас. % Al_2O_3 і стронціаніт SrCO_3 з вмістом основної речовини 99,0 мас. %. Означені сировинні компоненти були взяті у співвідношеннях, які б мали забезпечувати при спіканні кераміки синтез заданої фази славсоніту $\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (далі $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Провідними властивостями такої кераміки, яка використовується як радіопрозорий матеріал, є діе-

лектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат, значення яких залежать від повноти синтезу славсоніту.

Експериментальні порошки одного і того ж шихтового складу з вологістю 7 % ретельно перемішували і формували двома різними способами. Для статичного пресування використовували стандартний лабораторний гідравлічний прес з питомим тиском пресування 20–25 МПа (далі «прес»). Для реалізації імпульсного пресування застосували власноруч виготовлену лабораторну установку ударної дії (далі «установка») індукційно-динамічного типу (рис. 1).

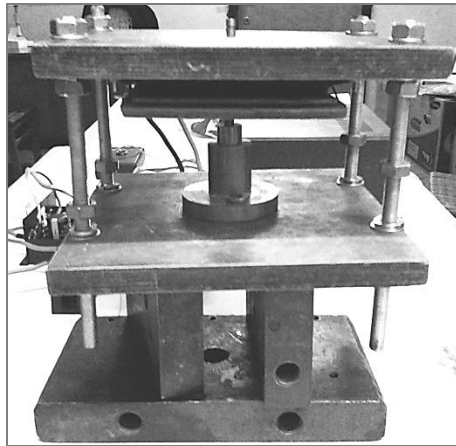


Рисунок 1 – Лабораторна установка для імпульсного пресування

Створення імпульсної силової дії в установці зумовлене взаємодією імпульсного магнітного поля індуктора з магнітним полем якоря, утвореним індуктованими в ньому вихровими струмами. Індуктор живиться від ємкісного накопичувача енергії (напруга 400 В, ємність 2850 мкФ). Порошок розміщували в металевій матриці і формували пуансоном, механічно з'єднаним з якорем. Установка забезпечувала імпульсну дію тривалістю 1 мс, імпульс тиску – 43 кПа·с та амплітуду тиску пресування 85 МПа.

В результаті статичного та імпульсного пресування були отримані циліндричні зразки правильної геометричної форми, які підлягали наступному випалу за температур 1250 °С, 1350 °С і 1450 °С. Випал зразків здійснювали в лабораторній муфельній печі з витримкою за максимальної температури протягом однієї години. Для отриманих зразків були визначені їх уявна густина як результат трьох паралельних вимірювань, а також фазовий склад з використанням рентгенофазового аналізу.

Обговорення результатів досліджень. При порівнянні уявної густини свіжесформованих зразків, було визначено, що імпульсне пресування дає змогу отримати більш щільні компакти, густина яких (1500 кг/м^3) виявилася на 12 % вищою за густину зразків, отриманих статичним пресуванням (1340 кг/м^3). Це відповідним чином відобразилося й на уявній густині випалених зразків (рис. 2).

Дані рис. 2 ілюструють виражену залежність густини зразків як від температури випалу, так від застосованого способу формування. За будь-якої температури випалу спостерігається приріст густини зразків, отриманих імпульсним пресуванням, по відношенню до густини зразків статичного пресування. Важливо при цьому відмітити, що температура випалу та імпульсний спосіб формування, як фактори впливу на густину, є майже рівнозначними. Так, наприклад, для підвищення густини зразків статичного

пресування від вихідного рівня 1570 кг/м^3 ($t=1250 \text{ }^\circ\text{C}$) можна використати більшу температуру випалу $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ і статичне пресування, збільшивши при цьому значення густини лише на $3,1 \%$ (до 1620 кг/м^3). Або можна залишити таку саму температуру випалу $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ та застосувати імпульсне пресування, збільшивши густину вже на $5,4 \%$ (до 1655 кг/м^3). Означені закономірності дозволяють припустити схожий вплив імпульсного пресування на фазоутворення в матеріалах.

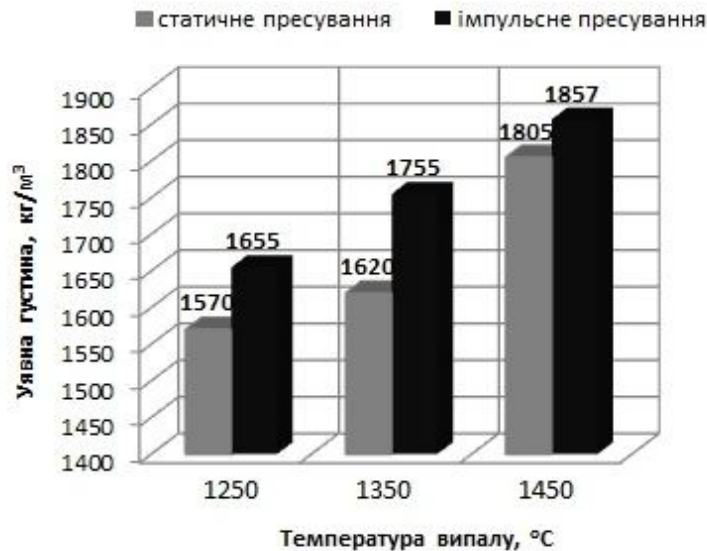


Рисунок 2 – Уявна густина керамічних зразків, отриманих різними способами формування

За допомогою рентгенофазових досліджень було здійснено кількісний аналіз фазового складу керамічних зразків, в тому числі з точки зору повноти синтезу в них славсоніту. Дані про кількість утворених фаз були отримані розрахунковим шляхом за інтегральними інтенсивностями їх дифракційних піків на рентгенограмах (табл. 1).

Таблиця 1 – Відносна кількість фаз (%) в керамічних зразках за даними рентгенофазового аналізу

Температура випалу, °C	Спосіб пресування	
	статичне	імпульсне
1250	славсоніт – 69 % силікат стронцію - 31 %	славсоніт – 82 % силікат стронцію – 18 %
1350	славсоніт – 100 %	славсоніт – 100 %
1450	славсоніт – 100 %	славсоніт – 93 % склофаза – 7 %

З даних наведеної таблиці можна побачити, що спосіб формування впливає на фазовий склад керамічних матеріалів, зокрема на синтез славсоніту. За температури випалу $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ вихід цієї фази вищий у зразках імпульсного пресування, що пов'язано

з більшою густиною спресованих зразків, зростанням кількості контактів між частками порошку і, як наслідок, більшою реакційною здатністю системи. Ще одним поясненням більш повного синтезу славсоніту у зразках, отриманих за температури випалу 1250 °С, є те, що імпульсне пресування за рахунок значної ударної сили зазвичай приводить до руйнування часток порошку під час формування та підвищення його дисперсності, від якої напряду залежить швидкість твердофазного спікання.

Звертає на себе увагу наявність невеликої кількості склофази (7 %) у зразках імпульсного пресування, отриманих за температури 1450 °С. Її утворення може бути пов'язано з наявністю домішок у сировині (зазвичай Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O та ін.), які за такої температури можуть утворювати евтектичні суміші разом із SiO_2 , Al_2O_3 або між собою, що спричиняє появу розплаву. Факт відсутності склофази у зразках, спресованих статичним способом, і, навпаки, – її присутність у зразках імпульсного пресування – також свідчить про більш активні фазові перетворення у таких матеріалах.

З урахуванням тенденцій зміни фазового складу кераміки і більшого виходу славсоніту у зразках імпульсного пресування за температури 1250 °С можна прогнозувати, що повний синтез славсонітової фази в таких матеріалах відбуватиметься за знижених температур випалу в порівнянні з матеріалами статичного пресування.

Висновки. Експериментально встановлена ефективність імпульсного пресування як методу консолідації технічних порошоків, який підвищує реакційну здатність порошкової системи, активує спікання і дозволяє проводити синтез заданих фаз за знижених температур випалу. Індукційно-динамічний метод пресування може слугувати резервом енергозбереження в керамічних технологіях, які використовують напівсухий спосіб формоутворення напівфабрикатів. Наступні дослідження мають бути спрямовані на розширення областей використання даного методу формоутворення в різних керамічних технологіях.

Література

1. Kaygorodov A.S. Fabrication of $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$ transparent ceramics by pulsed compaction and sintering of weakly agglomerated nanopowders / A.S. Kaygorodov, V.V. Ivanov, V.R. Khrustov [etc] // Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – vol. 27. – № 2–3. – pp. 1165–1169.
2. Хасанов О.Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий / Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Бикбаева З.Г. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 212 с.
3. Анненков Ю.М. Эффективность методов прессования корундо-циркониевых порошков различной дисперсности / Ю.М. Анненков, В.В. Иванов, А. С. Ивашутенко [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 39–42.
4. Нескоромный С.В. Разрядно-импульсное прессование композиционных материалов / С.В. Нескоромный, С.В. Лемешев, С.О. Агеев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 4(83). – С. 76–81.
5. Ломаева С.Ф. Объемные нанокомпозиты $\text{Fe} - \text{TiC} - \text{Fe}_3\text{C}$, полученные механосплавлением в жидких органических средах и магнитно-импульсным прессованием / С.Ф. Ломаева, К.А. Язовских, А.Н. Маратканова [и др.] // Перспективные материалы. – 2012. – № 4. – С. 61–69.

Bibliography (transliterated)

1. Kaygorodov A.S. Fabrication of Nd:Y₂O₃ transparent ceramics by pulsed compaction and sintering of weakly agglomerated nanopowders / A.S. Kaygorodov, V.V. Ivanov, V.R. Khrustov [etc] // Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – vol. 27. – № 2–3. – pp. 1165–1169.
2. Khasanov O.L. Metody kompaktirovaniya i konsolidatsii nanostrukturnykh materialov i izdeliy / Khasanov O.L., Dvilis E.S., Bikbayeva Z.G. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. – 212 p.
3. Annenkov Yu.M. Effektivnost metodov pressovaniya korundo-tsirkonievyykh poroshkov razlichnoy dispersnosti / Yu.M. Annenkov, VV Ivanov, AS Ivashutenko [i dr.] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – T. 308. – № 7. – P. 39–42.
4. Neskromnyiy S.V. Razryadno-impulsnoe pressovanie kompozitsionnykh materialov / S.V. Neskromnyiy, S.V. Lemeshev, S.O. Ageev // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – № 4(83). – P. 76–81.
5. Lomaeva S.F. Ob'emnyye nanokompozity Fe – TiC – Fe₃C, poluchennyie mehanosplavlenniem v zhidkikh organicheskikh sredah i magnitno-impulsnyim pressovaniem / S.F. Lomaeva, K.A. Yazovskih, A.N. Maratkanova [i dr.] // Perspektivnyie materialy. – 2012. – № 4. – P. 61–69.

УДК 666.3 : 621.3

Щукина Л.П., Болюх В.Ф., Лигезин С.Л., Захаров А.В., Противень А.С.

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДА КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВ
НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ**

В статье приведен сравнительный анализ влияния статического и импульсного методов прессования порошков на плотность и фазовый состав славсонитовой керамики. С помощью рентгенофазового анализа исследованы изменения в фазовом составе керамических материалов в зависимости от температуры их обжига. Установлено, что индукционно-динамическое прессование способствует более полному синтезу славсонитовой фазы при пониженных температурах обжига в сравнении с керамикой, полученной статическим прессованием.

Shchukina L.P., Bolyukh V.F., Lihezin S.L., Zakharov A.V., Protiven A.S.

**EFFECT OF METHOD OF POWDER CONSOLIDATION ON PHASE FORMATION
OF TECHNICAL CERAMICS**

The paper presents a comparative analysis of the influence of static and pulsed dry pressing methods on density and phase composition of ceramic on the base of slavsonit. Using X-ray phase analysis, changes in the phase composition of ceramic materials depending on their temperature of burning have been studied. It is established that induction-dynamic pressing promotes a more complete synthesis of the slavsonit at lower firing temperatures in comparison with ceramics obtained by static pressing.

УДК 661.185:66.2

Дзевочко О.М., к.техн.н., доцент, Подустов М.О., д.техн.н., професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

НОВІ ГОФРОВАНІ НАСАДКОВІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В АБСОРБЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Ключові слова: гофри, насадкові елементи, шкідливі речовини, очистка, абсорбційна система.

Вступ. Зниження викиду шкідливих речовин в атмосферу можливо шляхом створення не тільки нових прогресивних енерго- і ресурсозберігаючих технологічних процесів, а й сучасних технологічних схем очищення і високоефективних видів масообмінних апаратів [1, 2].

Видалення газоподібних компонентів з газоповітряного потоку на основі їх взаємодії з рідкими поглиначами відноситься до абсорбційних процесів. Стосовно до газоподібних викидів абсорбційні процеси найчастіше використовують для санітарної очистки газів. З огляду на незначну концентрацію викидних газів визначальну роль в процесі очищення має процес масообміну між газом і рідиною [3].

В абсорбційних процесах масообмін відбувається на поверхні зіткнення фаз. Внаслідок цього абсорбційні системи повинні мати сильно розвинену поверхню зіткнення, що досягається різними методами. Найбільшого поширення в цьому випадку отримали насадкові абсорбційні колони завантажені насадкою різної геометричної форми [4, 5]. Зіткнення між газом і рідиною відбувається на змоченій поверхні насадки, по якій стікає рідина, якою її зрошують.

В даний час у виробництві поверхнево-активних речовин використовуються різні методи санітарної очистки від залишків дво- та триоксиду сірки в газоповітряному потоці [6, 7]. Найчастіше в якості насадок в абсорбційних колонах використовуються кільця Рашига, сідла Інталокс та ін. Однак вони не дають енергоефективної роботи абсорбційної системи.

Мета роботи. Розробка нових перспективних насадкових елементів для використання в абсорбційних системах виробництва поверхнево-активних речовин.

Основна частина. Нові насадкові елементи для роботи в абсорбційних системах повинні мати властивості, які, з одного боку, збільшують швидкість процесів, а з іншого – зменшують опір газорідинному потоку, тобто забезпечують енергозбереження.

Розглянемо насадкові елементи з гофрами різної геометричної форми й розмірів, які можуть внести зміни в процеси абсорбції, у виробництві поверхнево-активних речовин.

Найчастіше насадкові елементи були модифікацією широко застосовуваних у сучасних технологіях, кілець Рашига.

Проведемо порівняльний аналіз кілець Рашига і різних його модифікацій. Однією з модифікацій стандартних кілець Рашига – це наявність гофрів у вигляді поперекових округлих ребер, як на зовнішній поверхні циліндра, так і на внутрішній (рис. 1).

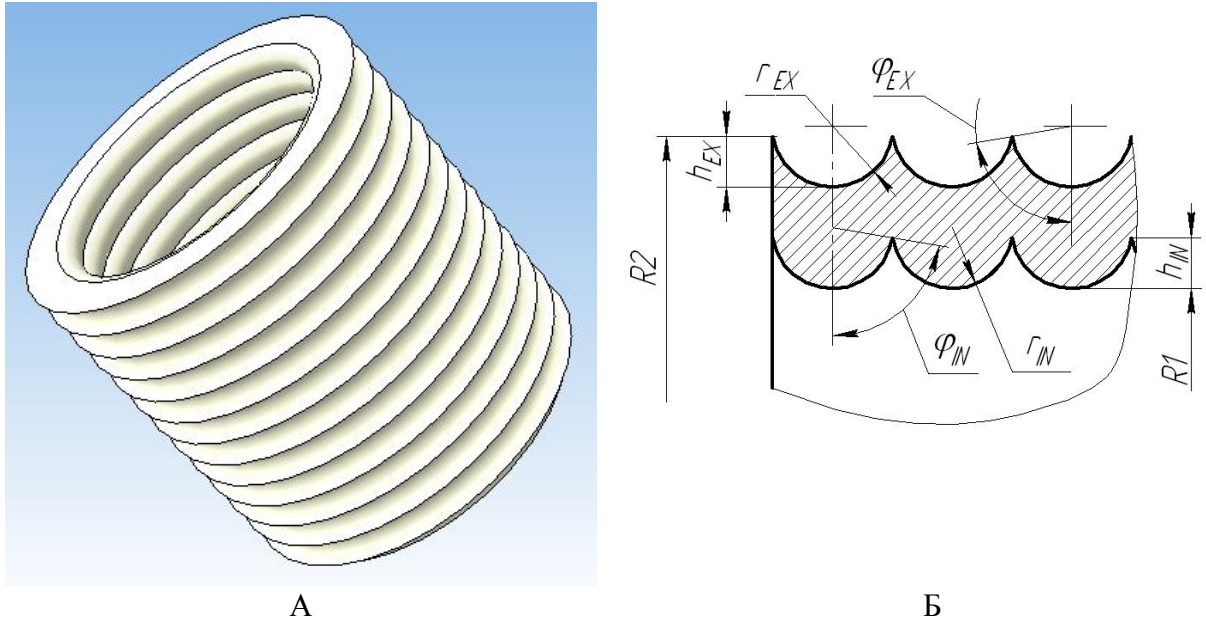


Рисунок 1 – Гофрований насадковий елемент з поперековими округлими ребрами

Відомо [8], що опір сухих насадок обчислюється за формулою

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{a^{1.2}}{\varepsilon^3}, \quad (1)$$

де ΔP – падіння тиску газу в колоні без зрошення, Па; H – довжина (висота), на якій падає тиск, м; a – питома поверхня насадки, м^2 ; ε – питомий вільний обсяг насадки, м^3 .

Звідси видно, що відношення опорів насадки з гофрами й кілець Рашига має вигляд:

$$\frac{\Delta P_z}{\Delta P_p} = \left(\frac{a_z}{a_p} \right)^{1.2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_z} \right)^3. \quad (2)$$

Розглянемо геометричні параметри насадкових елементів, які завантажені в абсорбційну колону. Якщо в колону обсягом V_k міститься n_z гофрованих елементів, то загальна поверхня $S_z^{\text{заг}}$ цих елементів дорівнює:

$$S_z^{\text{заг}} = n_z \cdot S_z, \quad (3)$$

де S_z – поверхня одного елемента, м^2 .

Вільний обсяг $V_{\text{вкз}}$ у колоні, що залишається після завантаження n_z гофрованих елементів, рівний:

$$V_{\text{вкз}} = n_2 \cdot V_{\text{вз}} + (V_{\text{к}} - \pi R_2^2 \cdot H \cdot n_2), \quad (4)$$

де $V_{\text{вз}}$ – вільний обсяг одного елемента, м³; R – зовнішній радіус елемента, м; H – висота елемента, м.

Відкіля

$$a_2 = \frac{S_2^{\text{заг}}}{V_{\text{к}}}, \quad \varepsilon_2 = \frac{V_{\text{вкз}}}{V_{\text{к}}}. \quad (5)$$

Аналогічні параметри для кілець Рашига обчислюються:

$$S_p = 2\pi \cdot H \cdot (R_1 + R_2), \quad (6)$$

$$V_{\text{вкр}} = \pi R_1^2 \cdot H, \quad (7)$$

де R_1 – внутрішній діаметр кільця Рашига, м; R_2 – зовнішній діаметр кільця Рашига, м; H – висота кільця Рашига, м.

Відповідно, для n_p елементів у колоні:

$$S_p^{\text{заг}} = n_p \cdot S_p, \quad (8)$$

$$V_{\text{вкр}} = n_p \cdot V_{\text{вкр}} + (V_{\text{к}} - \pi R_2^2 \cdot H \cdot n_p), \quad (9)$$

$$a_p = \frac{S_p^{\text{заг}}}{V_{\text{к}}}; \quad \varepsilon_p = \frac{V_{\text{вкр}}}{V_{\text{к}}}. \quad (10)$$

Щоб зрівняти енергетичні характеристики кілець Рашига й гофрованих елементів, зручно розглядати однакові колони за умови, що площі поверхні обох елементів рівні. За інших рівних умов, це означає рівність коефіцієнтів швидкості масообміну. Тобто кількість n_2 знайдемо зі співвідношення: $S_p = S_2$.

З рівнянь (3) і (8) отримуємо:

$$n_2 = n_p \cdot \frac{S_p}{S_2}. \quad (11)$$

З останньої формули видно, що якщо $S_2 > S_p$, то $n_2 < n_p$.

Розрахунки показали, що при цьому: $V_{\text{вз}} > V_{\text{вкр}}$.

Отримані співвідношення говорять про те, що виграш у вільному обсязі досягається не за рахунок додаткового обсягу самих гофрів, які дають малий внесок у загальний вільний обсяг, а за рахунок великої питомої площі гофрованої поверхні.

Це дає можливість використовувати меншу кількість одиничних насадкових елементів, зберігаючи швидкість масообміну.

Була встановлена $F(h,l)$ – залежність, яка дає відношення опорів гофрованого насадкового елемента та кілець Рашига:

$$\Delta P_c / \Delta P_p = F(h,l) = (1 - A \cdot h^\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot l)), \quad (12)$$

$$A = 0.684, \alpha = 0.257, \beta = 0.436. \quad (13)$$

де: параметри гофра – глибина h й довжина l – вимірюються в міліметрах.

Відсутність гофрування відповідає $h \rightarrow 0$. При цьому гофрований насадковий елемент перетворюється в кільце Рашига й $F \rightarrow 1$. Збільшення h (при заданому значенні l) веде до зменшення функції F , тобто – до зменшення опору. Але з геометричних міркувань можна побачити, що збільшувати глибину гофра має сенс до значення $l/2$.

Розглянемо, які зміни в параметри насадкового елемента вносить наявність гофра трикутного перетину на бічній поверхні елемента (рис. 2 А, Б). Будемо вважати, що гофри нанесені у поперекових ребер на поверхні циліндра.

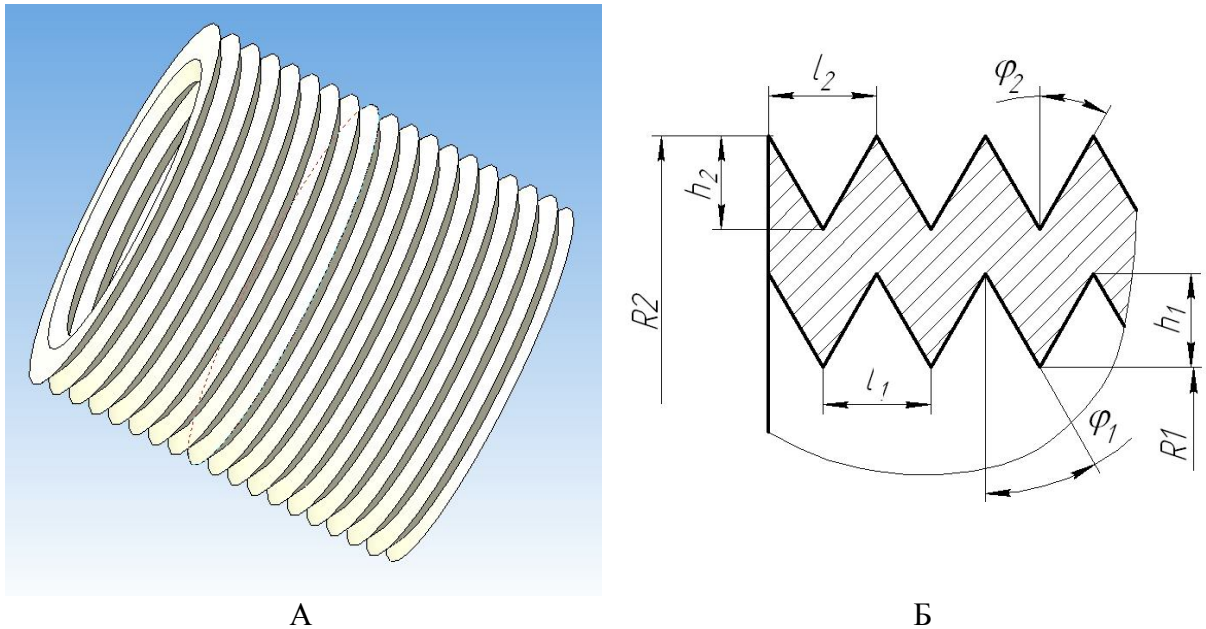


Рисунок 2 – Гофрований насадковий елемент з поперековими трикутними гофрами

Якщо поверхня гладка, тобто не містить гофрів, то її площа – це площа зовнішньої поверхні одного кільця Рашига. Вона обчислюється як:

$$S_p = 2\pi \cdot R_2 \cdot H. \quad (14)$$

Нехай на поверхню нанесено один гофр із поперековим перерізом у вигляді рівностороннього трикутника. Вісь цього гофра – перпендикулярне коло навколо осі циліндра. Основа трикутника становить частину утворюючої зовнішнього циліндра, Протилежна основі трикутника вершина (N) – лежить усередині стінки. Висоту трикутника, проведеної з вершини на основу, позначимо – h_2 , а довжину основи – l_2 .

Нижче, усі параметри буде зручно виражати через h_2 . Поверхня гофра – це площа 2-х похилих стінок, які утворені обертанням 2-х бічних сторін трикутника. Позначимо довжину кожної із цих сторін – L_2 . Тоді площа гофра дорівнює:

$$S_{2mp}^I = 2\pi \cdot R_2 \cdot 2 \cdot L_2, \quad (15)$$

де S_{2mp}^I – зовнішня поверхня одного трикутника, м².

Довжину бічної сторони трикутника, L_2 , можна виразити через висоту

$$L_2 = h_2 / \cos(\varphi_2), \quad (16)$$

де φ_2 – половина кута трикутника при вершині N .

Тоді:

$$S_{2mp}^I = 4\pi \cdot R_2 \cdot h_2 / \cos(\varphi_2). \quad (17)$$

Тепер розглянемо циліндр, у якого гофри у вигляді поперекових кілець “покладені щільно” на зовнішній бічній поверхні.

Їхню кількість, n_{2mp} , можна розрахувати :

$$n_{2mp} = H / l_2. \quad (18)$$

Тоді загальна площа всіх гофрів дорівнює:

$$S_{2mp} = S_{2mp}^I \cdot n_{2mp} = 4\pi R_2 \cdot H \cdot [h_2 / l_2 \cdot \cos(\varphi_2)], \quad (19)$$

і враховуючи, що

$$l_2 / (2 \cdot h_2) = \operatorname{tg}(\varphi_2), \quad (20)$$

одержимо:

$$S_{2mp} = 2\pi R_2 \cdot H / \sin(\varphi_2). \quad (21)$$

В останньої формули є кілька властивостей, які вимагають пояснення:

При фіксованій глибині гофра h_2 , зменшення кута φ_2 означає зменшення довжини гофра l_2 й, відповідно, збільшення кількості гофрів на бічній поверхні при їхньому щільному укладанні – n_{2mp} . А тому що площа одного гофра прямо пропорційна величині l_2 , яка прагне не до 0, а до постійного значення ($l_2 \rightarrow h_2$), це дає ефект росту сумарної площі бічної поверхні при збільшенні кількості гофрів.

Можна обчислити мінімальний виграш у площі, який дає трикутний гофр фіксованої глибини, на циліндрі заданої висоти H .

Свого мінімуму величина S_{2mp} досягає при максимальному значенні кута φ_2 . А це відбувається, коли на довжині H “щільно покладений” усього 1 гофр, тобто перетин – це трикутник, у якого $l_2 = H$, і виконується співвідношення:

$$tg(\varphi_{2max}) = 1 / 2 \cdot H / h_2. \quad (22)$$

Таким чином, одержуємо:

$$S_{2mp}^{min} = 2\pi \cdot R_2 \cdot H / \sin(\varphi_{2max}), \quad (23)$$

де:

$$\varphi_{2max} = arctg(H / 2h_2). \quad (24)$$

При $h_2 \rightarrow 0$, $\varphi_{2max} \rightarrow \pi / 2$ і $S_{2mp} = 2\pi \cdot R_2 \cdot H$, що означає відсутність гофра й перетворення гофрованого кільця в гладке кільце Рашига. Будь-яке ненульове значення h_2 дає вигравш у площі поверхні елемента насадки. Це значення на практиці обмежене зверху товщиною стінки циліндра, d , при цьому повинне виконуватися співвідношення $h_2 < d$.

Вищенаведені формули і висновки слушні також і для гофрів на внутрішній поверхні циліндра. У цьому випадку потрібно використовувати радіус R_1 замість R_2 . Площа внутрішньої поверхні (нижній індекс – 1) з “трикутними” гофрами:

$$S_{1mp} = 2\pi R_1 \cdot H / \sin(\varphi_1), \quad (25)$$

де

$$\varphi_1 = arctg(h_1 / 2 \cdot l_1), \quad (26)$$

$$(h_1 + h_2) < d. \quad (27)$$

Тепер розрахуємо обсяг трикутних гофрів на бічній поверхні циліндра. Як і у випадку обчислення площі, спочатку будемо розглядати гофри у вигляді поперекових ребер на зовнішній поверхні. Обсяг одного такого кільцеподібного гофра дорівнює добутку площі його поперекового перерізу на довжину кільця. Перетин – це рівнобічний трикутник з основою l_2 й висотою h_2 . Його площа $S_{2mp} = h_2 \cdot l_2 / 2$, довжина зовнішнього кільця – $L_2 = 2\pi \cdot R_2$. Кількість гофрів (n_{2mp}), щільно розташованих уздовж висоти циліндра H , уже підраховане раніше. Воно дорівнює $n_{2mp} = H / l_2$. Звідси одержуємо загальний обсяг усіх гофрів на зовнішній поверхні циліндра:

$$V_{2mp} = \pi R_2 \cdot H \cdot h_2. \quad (28)$$

Для визначення обсягу гофрів на внутрішній поверхні циліндра формула – аналогічна.

$$V_{1mp} = \pi R_1 \cdot H \cdot h_1. \quad (29)$$

Параметри a та ε для насадкового елемента із трикутними гофрами розраховуються аналогічно гофрам округлої форми по формулі (5).

Тепер розрахуємо аналогічні параметри – площа поверхні й вільний обсяг – для гофрів трапецевидного перетину (рис. 3 А, Б).

Розглянемо на зовнішній поверхні циліндра один гофр із поперековим перерізом у вигляді трапеції. Поверхня такої гофри складається з 2-х бічних стінок і основи. Одна сторона цієї поверхні – це висота циліндра H , інша – ламана, що полягає з 2-х рівних бічних і основи. Позначимо довжину половини цієї складної ламаної через L_{2mpan} .

Площа поверхні одного зовнішнього трапецевидного гофра дорівнює:

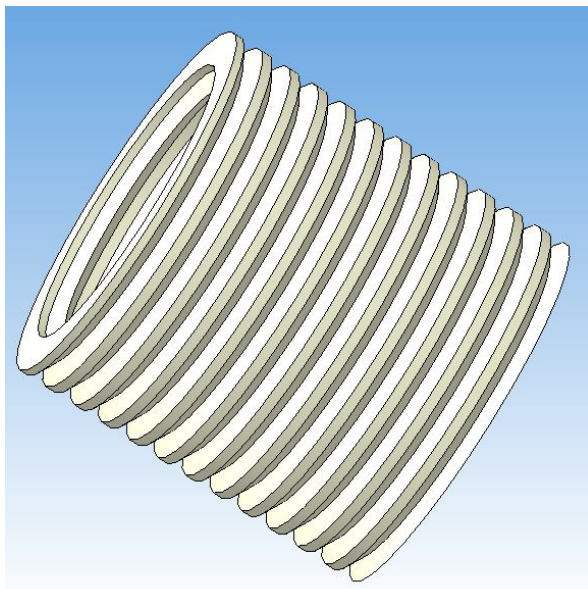
$$S_{2mpan}^I = H \cdot 2 \cdot L_{2mpan} . \quad (31)$$

Розрахуємо довжину L_{2mpan} , використовуючи ті ж позначення, що й для трикутного гофра. Додатковим параметром тут є радіус R_{2mpan} . Нехай половина довжини основи трапеції – b_2 (вона може бути виражена через R_{2mpan}). Довжина бічної стінки трапеції, c_{2mpan} , дорівнює:

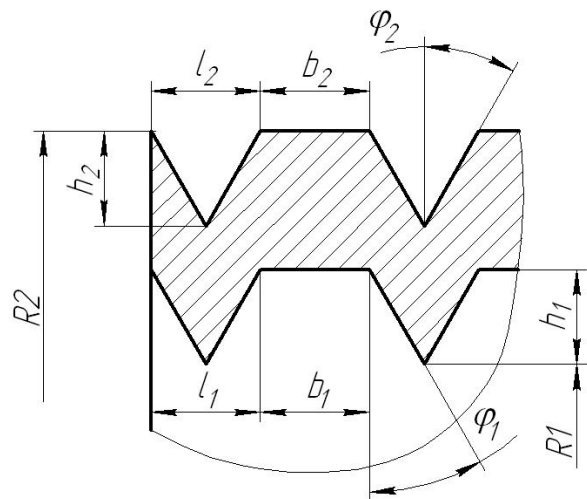
$$c_{2mpan} = L_{2mpan} - b_{2mpan} / \sin(\varphi_2) , \quad (32)$$

тоді

$$L_{2-i} = b_2 + c_2 = b_2 + L_2 - b_2 / \sin(\varphi_2) . \quad (33)$$



А



Б

Рисунок 3 – Гофрований насадковий елемент з поперековими трапецеподібними гофрами

Для зручності запишемо

$$L_{2-i} = L_{2mpan} + \Delta_{2-i} \quad (34)$$

$$\Delta_{2-i} = b_{2mpan} \cdot [1 - 1 / \sin(\varphi_2)] \quad (35)$$

З рівняння (34) видно, що $\Delta_{2-i} < 0$ й $L_{2-i} < L_{2mpan}$. Це значить, що площа поверхні в трапецевидного гофра менше, чим у трикутного.

Але по-перше, трапецевидний гофр можна будувати й іншим чином. Наприклад, коли основою трапеції буде не відрізок прямої лінії, а переважаючий його відрізок дуги кола. При цьому, “трапецевидна” площа поверхні може виявитися більше “трикутної”.

По-друге, для зменшення гідродинамічного опору насадки важливо зростання не площі поверхні, а вільного обсягу – так, щоб величина

$$\psi = \frac{a^{1.2}}{\varepsilon^3} \quad (36)$$

була мінімальною.

З рівняння (36) отримуємо, що при збільшенні площі поверхні опір навіть зростає, але при вдало обраній геометрії елемента насадки, зі збільшенням параметра a повинен збільшуватися й параметр ε так, щоб величина ψ зменшувалася.

Розрахуємо загальну площу поверхні щільно покладених гофрів даної геометрії, яка дорівнює добутку площі одного гофра – S_{2c}^1 на їхню кількість – n_{2c} .

$$S_{2c} = S_{2c}^1 \cdot n_{2c}. \quad (37)$$

Значення n_{2c} рівне $2\pi R_2 / 2l_2$.

Підставляючи вираження (31), (34) в (37) одержуємо:

$$S_{2c} = 2\pi \cdot R_2 \cdot H \cdot [(L_2 - \Delta_{2-i}) / l_2]. \quad (38)$$

Вираз (38) отриманий для випадку, коли гофри витягнуті уздовж (утворюючої циліндра їх осі – прямі лінії, паралельні висоті циліндра H), але з (38) видно що загальна площа поверхні трапецевидних гофрів визначається тільки параметрами циліндричної поверхні (R_2 , H) і розмірами одного гофра (L_2 , l_2 , Δ_{2-i}), але не залежить від форми лінії – осі на поверхні циліндра, уздовж якої “покладені” гофри.

Такі ж властивості мають гофри й іншої геометричної форми – зокрема, напівколо й трикутник.

Співвідношення (34 – 35) є головними у розрахунку параметрів насадки. Тепер неважко розрахувати питомий вільний обсяг насадки в колоні.

Гофри на зовнішній поверхні дають внесок:

$$V_{2c} = S_{2c} \cdot H = 2\pi \cdot R_2 \cdot H^2 \cdot [(L_{2mpan} - \Delta_{2mpan}) / l_2]. \quad (39)$$

Внутрішні гофри та циліндрична порожнина додають до (39):

$$V_{1c} = S_{1c} \cdot H = 2\pi \cdot R_1 \cdot H^2 \cdot [(L_{1mpan} - \Delta_{1mpan}) / l_1] + \pi R_1^2 \cdot H. \quad (40)$$

Вільний обсяг одного елемента насадки з гофром дорівнює:

$$V_{\text{вк2}} = V_{1\text{вк2}} + V_{2\text{вк2}}. \quad (41)$$

Далі, знаючи кількість елементів, n_z , завантажених в колону обсягу V_k , одержимо вільний обсяг у колоні

$$V_{\text{вк2}} = n_z \cdot V_{\text{вк2}} + (V_k - \pi R^2 \cdot H \cdot n_z), \quad (42)$$

$$a = \frac{V_{\text{вк2}}}{V_k}. \quad (43)$$

Таким чином можна стверджувати, що гофровані насадкові елементи можуть знайти використання в абсорбційних системах.

Висновки. Результати теоретичних досліджень показали перспективність застосування насадкових елементів різної геометричної форми. В порівнянні з кільцями Рашига вони мають більшу поверхню і більший вільний обсяг. Для кінцевого вибору з 3-х елементів, які були розглянуті, необхідно провести експериментальні дослідження в умовах дослідної установки.

Література

1. Процеси і апарати хімічної технології: Підручник / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.П. ГОТЛІНСЬКА, В.О. ЛЕЩЕНКО та інші: За заг. ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 540 с.
2. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов // – М.: Химия, 1990. – 384 с.
3. Рамм В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 655 с.
4. Бучинський А.К. Основи технології та техніки абсорбційних процесів: Навчальний посібник / А.К. Бучинський, В.С. Коваленко. – Днепропетровськ: УДХТУ, 2004. – 155 с.
5. Коваленко І.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: Воля, 2006. – 261 с.
6. Смола В.И. Защита атмосферы от двуокиси серы / В.И. Смола, Н.В. Кальцев // – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.
7. Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды / Н.С. Торочешников, А.И. Родионов, В.И. Клушин // Учебное пособие для вузов. – М.: Химия, 1988. – 368 с.

Bibliography (transliterated)

1. Protsesy i aparaty khimichnoi tekhnolohii: Pidruchnyk / L.L. Tovazhnianskyi, A.P. Hotlinska, V.O. Leshchenko ta inshi: Za zah. red. L.L. Tovazhnianskoho. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. – 540 p.
2. Romankov P.G. Massoobmennyie protsessyi himicheskoy tehnologii / P.G. Romankov, V.F. Frolov // – M.: Himiya, 1990. – 384 p.
3. Ramm V.M. Absorbtsiya gazov / V.M. Ramm. – M.: Himiya, 1976. – 655 p.

4. Buchynskiy A.K. Osnovy tekhnolohii ta tekhniky absorbtsiinykh protsesiv: Navchalnyi posibnyk / A.K.Buchynskiy, V.S. Kovalenko. - Dnepropetrovsk: UDKhTU, 2004. – 155 p.
5. Kovalenko I.V. Osnovni protsesy, mashyny ta aparaty khimichnykh vyrobnytstv / I.V. Kovalenko, V.V. Malynovskiy. – K.: Volia, 2006. – 261 p.
6. Smola V.I. Zashchita atmosferyi ot dvoukisi seryi / V.I. Smola, N.V. Kaltsev // – M.: Metallurgiya, 1976. – 256 p.
7. Torocheshnikov N.S. Tehnika zashchityi okruzhayushey sredy / N.S. Torocheshnikov, A.I. Rodionov, V.I. Klushin // Uchebnoe posobie dlya vuzov. – M.: Himiya, 1988. – 368 p.

УДК 661.185:66.2

Дзевочко А.М., к. техн. н., доцент, Подустов М.А., д.техн. н., профессор

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

НОВЫЕ ГОФРИРОВАННЫЕ НАСАДОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АБСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В статье рассмотрены вопросы повышения энерго- и ресурсосбережения в схемах очистки газовых выбросов в производстве поверхностно-активных веществ а также в газо-жидкостном массообмене оборудования.

Проведенный анализ предложенных гофрированных насадок с развитой поверхностью в виде поперечных ребер, разной геометрической формы, как на внутренней так и на внешней поверхности цилиндра, показал перспективность использования таких насадочных элементов.

Dzevochko O.M., Podustov M.O.

NEW RIBBED PACKED ELEMENTS FOR USE IN ABSORPTION SYSTEMS

The article discusses the issues of increasing energy and resource saving in schemes for cleaning gas emissions in the production of surfactants and also in gas-liquid mass-produced equipment.

The analysis of the proposed ribbed packed with developed surface in the form of transversely edges, different geometric shapes, both on the inner and outer surface of the cylinder, has shown of using such packing elements are perspective.

Тесленко М.Г., аспірант

Харківський національний університет будівництва та архітектури

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМЕРСІЙНОГО ЗМОЧУВАННЯ
МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПРОТІКАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
АЛГОРИТМУ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ**

Ключові слова: імерсійне змочування, змочування порошків, автоматизована система вимірювань, аналіз зображення, бінарізація.

Вступ. Дослідження змочування матеріалу є необхідним для визначення його властивостей у різноманітних галузях. Існують два основних види змочування: контактне та імерсійне. При контактному змочуванні основною величиною, що вимірюється, є рівноважний крайовий кут [11], але при імерсійному змочуванні його безпосереднє визначення неможливе. Визначення рівноважного крайового кута змочування є основоположним для визначення поверхневої енергії матеріалів [7].

При цьому необхідно проводити дослідження не лише твердих, а і дисперсних матеріалів, що робить актуальною розробку відповідного методу. Так, у [8] пропонується метод гранулометричного аналізу для дослідження властивостей вугільного пилу. У [10] розглядаються декілька методів дослідження змочування. Серед цих методів достатньо ефективним та придатним до автоматизації є метод визначення часу протікання рідини через порошок у трубці [9]. Розрахунок крайового кута змочування для даного методу проводиться виходячи із формули:

$$\cos(\theta) = V \frac{2h\eta}{r\sigma_{pc}}, \quad (1)$$

де θ – крайовий кут змочування, V – час протікання рідини, h – довжина трубки із порошком, r – радіус пор або часток порошку, що досліджується, η – в'язкість рідини, σ_{pc} – поверхневий натяг рідини. Усі параметри, крім часу протікання V , є попередньо відомими для рідини, що використовується у експерименті.

Оцінка стану матеріалу за критерієм змочений/сухий виконується експертно на основі різниці у візуальних властивостях. Таким чином, на результат впливає людський фактор. При цьому неможливо оцінити похибку вимірювань, а отже і їх достовірність. Також питання викликає доцільність використання методу при швидких перехідних процесах, коли оператор може не встигнути зреагувати на зміну стану матеріалу.

Для підвищення точності подібних досліджень, а також для зменшення впливу людського фактору на результат, актуальною є задача автоматизації методу. Під автоматизацією розуміється опосередковане визначення сухого та змоченого матеріалу та встановлення часу змочування за допомогою апаратних та програмних засобів.

Зображення у якості джерела інформації. Для автоматизованого контролю необхідно використати датчики, що дозволять чисельно визначити параметри змочування. Такі датчики мають характеризуватися високою швидкістю і не контактувати із

матеріалом для забезпечення достовірності результатів. При цьому необхідно також забезпечити високу точність роботи первинних вимірювальних пристроїв, адже довжина трубки із матеріалом може бути менше п'яти сантиметрів. У такому випадку похибка у визначенні межі між змоченим та сухим матеріалом у декілька міліметрів може призвести до значних розбіжностей у кінцевих розрахунках.

Використання цифрового зображення у якості джерела інформації дозволить відстежувати візуальні параметри матеріалу із високою швидкістю, при чому аналіз сигналу буде покладено на програмні засоби ЕОМ. На відміну від інших методів, система комп'ютерного зору дозволяє проводити вимірювання без будь-якого втручання у сам процес, що гарантує відсутність впливу самої автоматизованої системи досліджень на параметри, що вимірюються. Також усувається необхідність апаратного налаштування при дослідженні матеріалів, властивості яких відрізняються, а сама система є універсальною і дозволить проводити вимірювання широкого спектру матеріалів. У випадку систем комп'ютерного зору усі налаштування можуть бути виконані програмно. Розробка алгоритму для відокремлення зображення сухого та змоченого матеріалу дозволить не тільки визначити повний час протікання процесу, а й відстежити динаміку його протікання, що може бути доцільним для наукових досліджень.

Для реалізації такого підходу необхідно використовувати лабораторну установку, яка відповідатиме вимогам отримання якісного зображення. При розробці установки має бути забезпечено якісне освітлення, використання виключно прозорих матеріалів для трубки із порошком, а також використання однорідного фону для чіткого відділення трубки. Крім того, під час проведення експерименту було встановлено, що тиск рідини, що залежить від висоти резервуару (рис. 1), впливає на час протікання рідини. Схему лабораторної установки для визначення змочування методом протікання зображено на рис. 1.

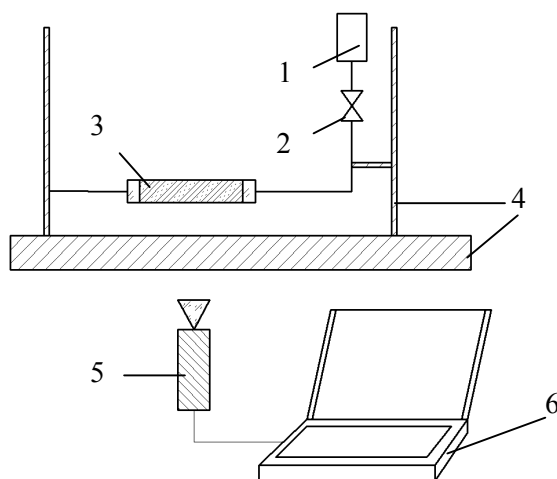


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки

- 1 – резервуар із рідиною; 2 – вентиль; 3 – трубка із матеріалом, що досліджується;
4 – штатив з підставкою; 5 – цифрова камера; 6 – персональний комп'ютер

Модель процесу змочування. Для отримання чисельних результатів (часу протікання процесу змочування) необхідно розробити алгоритм обробки зображення, що дозволить оцінити візуальні параметри та на основі цього визначити час протікання. Цей параметр можна сформулювати як різницю між часом початку процесу змочування

(рідина надходить до порошку у трубі) та завершенням процесу змочування (весь матеріал у трубі є змоченим):

$$t_{\text{змоч}} = t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}} \quad (2)$$

Основною задачею при розробці автоматизованого методу є визначення часу завершення змочування (2), адже час початку може бути виміряно однозначно, наприклад при відкритті вентилу. Для цього необхідно розділяти на зображенні змочений та сухий матеріал. Враховуючи те, що метод передбачає можливість дослідження широкого спектру матеріалів, а також різні параметри обладнання та освітлення, необхідно використовувати не абсолютні, а відносні візуальні властивості. Іншими словами, на основі отриманого потоку зображень алгоритм має виконувати класифікацію без використання апіорної інформації про параметри матеріалу.

Вихідним сигналом є потік зображень у режимі реального часу із деякою частотою. У даному випадку цифрове зображення розглядається як дискретна функція яскравості $I(x,y)$. Візуально яскравість змоченого матеріалу менша, ніж яскравість сухого для більшості досліджуваних матеріалів. Отже, значення пікселя, що відповідає змоченому матеріалу, буде меншим, ніж значення пікселя зображення сухого матеріалу. Враховуючи те, що напрям руху рідини є відомим, значення функції для фіксованої координати абсцис під час перехідного процесу можна розглядати наступним чином (рис. 2).

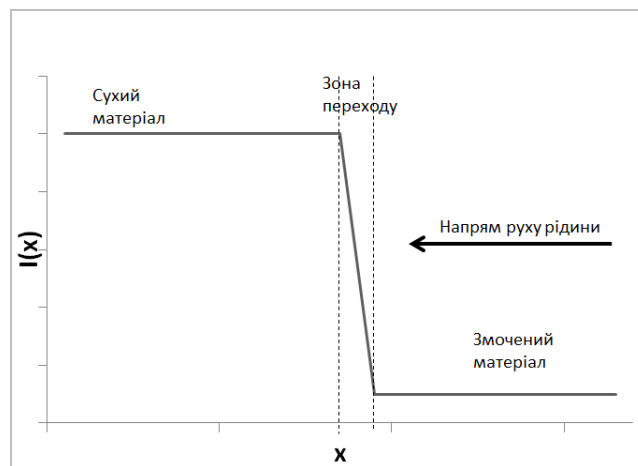


Рисунок 2 – Модель функції яскравості $I(x,y)$ для $y=\text{const}$

На рис. 2 показано перехідний процес у ідеальному випадку, коли умова $I_{\text{зм}} \gg I_c$ справедлива для кожного пікселя зображення. Але реальне зображення є неоднорідним і частина пікселів не відповідає умові, тому для побудови робастного алгоритму [12] використовувати лише одну умову неможливо. Так, на рис. 3 показано графік функції яскравості $I(x,y)$ при сталому значенні y . Також слід зазначити, що на початку процесу та після його завершення наявні лише пікселі змоченого або сухого матеріалу, а отже неможливо оцінити їх значення методом порівняння. При цьому можна стверджувати, що:

$$\sum_x \sum_y I_{x,y}(t_{\text{кін}}) > \sum_x \sum_y I_{x,y}(t_{\text{поч}}) \quad (3)$$

Основною задачею при побудові алгоритму є аналіз перехідного процесу у режимі реального часу та визначення межі розподілу між сухим та змоченим матеріалом.

Методи комп'ютерного зору. Для визначення межі розподілу необхідно відокремити змочений матеріал від сухого. Як було зазначено вище, використати сталі чисельні значення неможливо. Оцінити питомі параметри можна за допомогою статистичних методів.

Для прийняття рішення про належність матеріалу до сухого чи змоченого використовуються властивості яскравості, а саме різниці у яскравості між змоченим та сухим матеріалом. Задача розподілу пікселів зображення на два класи за критерієм значення функції яскравості відповідає задачі бінарізації [1], [2].

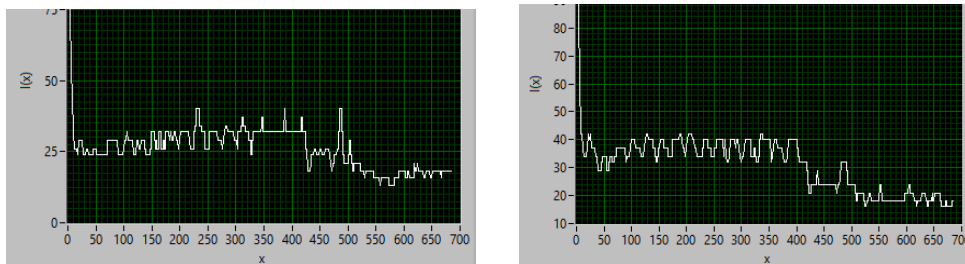


Рисунок 3 – Графік одномірної функції яскравості реального зображення трубки.
Пояснення у тексті

Суть бінарізації полягає у встановленні закону, за яким приймається рішення про належність пікселя до тої чи іншої групи. У більшості випадків кількість груп дорівнює двом. Для функції яскравості $I(x, y) \in \{0..2^k\}$ бінарізація відповідає відображенню:

$$I(x, y) \rightarrow R(x, y) \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

Найбільш простим методом є встановлення порогу розподілу вручну, після чого пікселі із значенням яскравості більшим (або меншим) за поріг набувають значення «1», а інші – значення «0». Для вирішення нашої задачі такий метод не може бути використано, адже параметри яскравості змінюються залежно від матеріалів, що досліджуються, освітлення та властивостей камери.

Автоматичні алгоритми визначення порогу розподілу можна розділити на два класи – глобальні та локальні. Глобальні методи встановлюють загальний поріг для усіх пікселів, а локальні методи дозволяють адаптуватися до особливостей зображення, враховуючи локальні особливості для кожного пікселя [3]. Такий підхід виявився ефективним при гранулометричному аналізі зображення матеріалу [6], але через особливості задачі, використовувати локальні параметри не ефективно, адже об'єктом дослідження є уся множина пікселів зображення трубки. Необхідно визначити закон перетворення, який даватиме однозначне визначення зображення змоченого та сухого матеріалу.

Ефективним методом глобальної бінарізації, що використовує статистичну інформацію, є метод Оцу [4]. Даний метод передбачає мінімізацію дисперсії всередині кожного з класів [5] (у нашому випадку – двох), що забезпечує максимізацію дисперсії між класами:

$$\sigma^2(t_i) = \max(\sigma^2(t)) \Rightarrow t_i = t_{otsu}; \quad (5)$$

$$\sigma^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)(\mu_1(t) - \mu_2(t))^2. \quad (6)$$

Виходячи із умови (3), такий підхід має забезпечити ефективний розділ зображення змоченого та сухого матеріалу. При цьому використовується гістограма зображення:

$$P_i = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M 1_{\{f(x,y)=i\}}. \quad (7)$$

Визначаються вірогідності двох класів як функцій порогу бінарізації t :

$$\omega_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} p(i)}{\sum p(i)}, \omega_2(t) = 1 - \omega_1(t). \quad (8)$$

На базі вірогідностей розраховується середнє арифметичне:

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} ip(i)}{\omega_1(t) \sum p(i)}, \mu_2(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} ip(i) - \mu_2(t) \omega_1(t) \sum p(i)}{\omega_2(t) \sum p(i)}. \quad (9)$$

Алгоритм полягає у ітеративному збільшенні порогу бінарізації та визначення описаних вище статистичних параметрів. Значення порогу t , при якому досягається найбільше значення дисперсії між класами (7), обирається як оптимальне і знаходиться бінарне зображення:

$$R_{x,y} = \begin{cases} 1, & I_{x,y} < t \\ 0, & I_{x,y} > t \end{cases}. \quad (10)$$

Аналіз бінарного зображення. Отримане у результаті бінарізації зображення дозволяє візуально виділити межу між сухим та змоченим матеріалом, проте необхідно розробити алгоритм, що дозволить формалізувати рішення. У частині бінарного зображення трубки із змоченим матеріалом більшість пікселів отримує значення «1» (рис. 4). Однак за через неоднорідність зображення розподіл не є ідеальним, і для чисельної оцінки межі розподілу необхідно провести додаткові перетворення. Сума пікселів у стовпці масиву зображення $R(x,y)$ характеризує належність цієї вибірки до одного з класів.

При ідеальному розподілі усі пікселі у стовпці, що відповідає змоченому матеріалу, будуть дорівнювати «1», а для сухого матеріалу «0». Для компенсації особливостей реального зображення використовується аналіз функції сум бінарного зображення $R(x,y)$ із розподільчою здатністю $N \times M$, що має вигляд:

$$L(x) = \sum_{y=0}^M R(x, y). \quad (11)$$

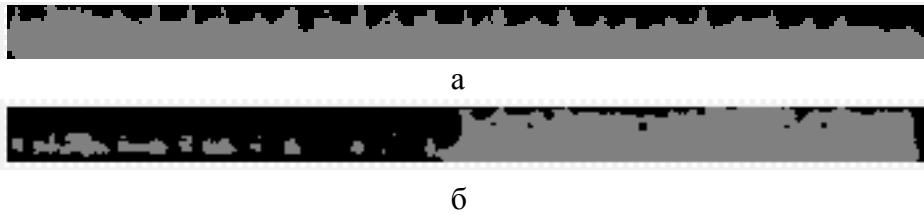


Рисунок 4 – Бінарізоване зображення трубки із матеріалом: перед початком експерименту, матеріал сухий (а); у процесі змочування, матеріал частково змочений (б)

Функція дозволяє чисельно оцінити вірогідність належності матеріалу до класу сухого або змоченого у будь-якій точці. Таким чином, із двомірного напівтонового зображення $I(x, y)$ (3) було отримано одномірну функцію $L(x)$ (11), що зменшує кількість можливих станів і полегшує остаточну класифікацію.

Для однозначного визначення межі розподілу необхідно встановити умову, виходячи із припущення, що функція не буде гарантовано мати граничних значень для зображення змоченого та сухого матеріалу. Межу можна визначити як константу, але це може призвести до необхідності налаштування алгоритму для кожного конкретного експерименту, а також підвищить імовірність похибки при навіть незначних збуреннях. Це недопустимо за умови проведення вимірювань у режимі реального часу.

Задача визначення межі розподілу схожа із задачею бінарізації. У цьому випадку також необхідно визначити оптимальне значення функції, що розмежує всю множину її значень на два класи. Для знаходження такого оптимального значення можна скористатися методами статистичного аналізу, що використовуються при бінарізації методом Оцу, модифікувавши їх до одномірної задачі. При цьому для розрахунку дисперсії використовується (5), формули для обчислення вірогідностей (7) та середнього арифметичного (8) також залишаються незмінними. Гістограма (6) замінюється на функцію:

$$p_i^{одн} = \sum_{x=0}^N 1_{\{L(x)=i\}}. \quad (12)$$

Точки перепаду функції (12) відповідають можливому положенню межі між змоченим та сухим матеріалом. Такий підхід дозволяє визначити межу розподілу між сухим та змоченим матеріалом при достатньо значних збуреннях функції. При використанні алгоритму до зображення трубки іноді можуть виникати помилкові перепади, в основному у крайніх положеннях трубки (рис. 5).

Такі збурення можуть бути усунені при використанні додаткових умов, що базуються на попередній інформації про стан протікання процесу, а також на моделі процесу, що використовується у даному дослідженні.

Для оцінки часу протікання процесу необхідно встановити таймер на початку процесу протікання. Визначення початку процесу може бути дано на основі аналізу функції сум (12). У випадку, коли функція має достатньо рівномірний розподіл, матеріал у трубці є однорідним, тобто, або змоченим, або сухим. Таким чином можна визначити і момент завершення процесу, при чому також можна відстежувати у режимі ре-

льного часу положення межі розподілу. Положення межі розподілу у кожній одиниці часу може бути записано у масив та опрацьовано після завершення вимірювання.

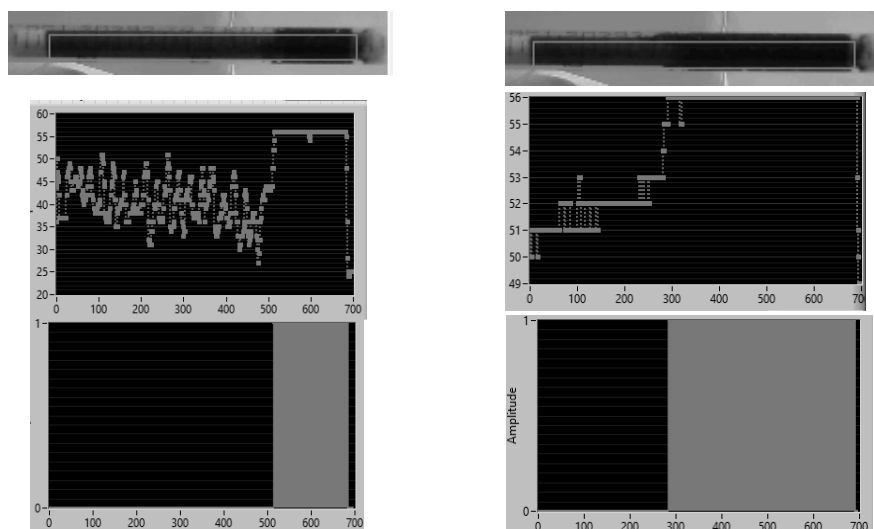


Рисунок 5 – Результат роботи алгоритму. Зверху – зображення трубки із матеріалом; всередині – функція сум; знизу – бінаризована функція сум

Висновки. У дослідженні було розроблено алгоритм обробки зображення у режимі реального часу, який дозволяє аналізувати процес змочування при проведенні досліджень методом визначення часу протікання. При цьому визначається положення межі між сухим та змоченим матеріалом, що дозволяє оцінити час протікання та динаміку процесу. На відміну від інших методів, автоматизована система вимірювань дозволяє оцінити параметри перехідного процесу, що може бути використано у подальших дослідженнях властивостей матеріалів. Також це може дозволити оцінити параметр r з рівняння (1), що забезпечить підвищення точності методу.

Алгоритм дозволив провести достатньо ефективний розподіл між сухим та змоченим матеріалом на усьому періоді протікання процесу. При цьому якість тестового зображення була досить низькою. Це свідчить про високу надійність алгоритму обробки зображення та стійкість до збурень.

Література

1. Forsyth A. A., Ponce J. Computer vision. A modern approach. Second edition. Pearson Education, 2011. – 792 p.
2. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing (3rd Edition). – Pearson. 2007. – 976 p.
3. Niblack W. An Introduction to Digital Image Processing. – Prentice Hall, 1986. – 215 p.
4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms.// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979. – Vol. 9 pp. 62–66.
5. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multi-level Thresholding.//Journal of Information Science and Engineering., 2001. –№17, pp. 713–727.

6. Teslenko M.H. Computer vision system for granulometric analysis of the sample of material. *Науковий вісник будівництва*, т. 90, №4, 2017. – с. 127–131.
7. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Meshchenko, A. Kosse Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system// *Східно-Європейський журнал передових технологій*, Vol.1 No12, 2018.– С. 9–17.
8. Голоскоков С.И., Недосекина Н.М., Сазонов М.С., Голоскоков Е.И., Терентьева Н.А. Метод определения смачивающей способности угольной, углепородной пыли растворами поверхностно-активных веществ. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*, 2014 – с. 99–102.
9. Конюхов В.Ю. Полимеры и коллоидные системы: учебное пособие, М: МГУП, 1999, 101 с.
10. Кудряшов В.В., Соловьева Е.А. Методы оценки пылесмачивающего действия растворов ПАВ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2009. – с. 157–169.
11. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания. М.: Химия, 1976.
12. Ходарев А., Моржин А., Желтов С., Визильтер Ю., Князь В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQVision.– ДМК Пресс, 2016. – 464 с.

Bibliography (transliterated)

1. Forsyth A. A., Ponce J. Computer vision. A modern approach. Second edition.– Pearson Education, 2011. – 792 p.
2. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing (3rd Edition). – Pearson. 2007. – 976 p.
3. Niblack W. An Introduction to Digital Image Processing. – Prentice Hall, 1986. – 215 p.
4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms.// *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979. – Vol. 9 pp. 62–66.
5. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multi-level Thresholding.//*Journal of Information Science and Engineering.*, 2001. –#17, pp. 713–727.
6. Teslenko M.H. Computer vision system for granulometric analysis of the sample of material. *Naukoviy visnik budivnitstva*, t. 90, #4, 2017. – p. 127–131.
7. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Meshchenko, A. Kosse Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system// *ShIdno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy*, Vol.1 No12, 2018.– P. 9–17.
8. Goloskokov S.I., Nedosekina N.M., Sazonov M.S., Goloskokov E.I., Terenteva N.A. Metod opredeleniya smachivayuschey sposobnosti ugolnoy, ugleporodnoy pyili rastvorami poverhnostno-aktivnyih veschestv. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2014 – p. 99–102.
9. Konyuhov V.Yu. Polimeryi i kolloidnyie sistemyi: uchebnoe posobie, M: MGUP, 1999, 101 p.
10. Kudryashov V.V., Soloveva E.A. Metodyi otsenki pyilesmachivayuscheho deystviya rastvorov PAV. *Gornyyiy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009. – p. 157–169.
11. Summ B.D. Fiziko-himicheskie osnovyi smachivaniya. М.: Himiya, 1976.

12. Hodarev A., Morzhin A., Zheltov S., Vizilter Yu., Knyaz V. Obrabotka i analiz tsifrovyyh izobrazheniy s primerami na LabVIEW i IMAQVision.– DMK Press, 2016.– 464 p.

УДК 004.932.2

Тесленко М. Г., аспірант

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИММЕРСИОННОГО СМАЧИВАНИЯ
МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОТЕКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Статья посвящена разработке автоматизированного метода измерения времени протекания жидкости в трубке с порошком. Данный метод позволяет проводить исследования иммерсионного смачивания с последующим расчетом равновесного краевого угла смачивания. В качестве источника информации для расчетов используется цифровой поток изображений. Для проведения вычислений разрабатывается алгоритм обработки и анализа изображений.

Teslenko Mykhailo, postgraduate student

**AUTOMATION OF THE IMMERSIONAL WETTING MEASUREMENTS BY THE
METHOD OF FLOW TIME MEASUREMENT WITH THE USE OF AN IMAGE
ANALYSIS ALGORITHM**

The article is devoted to the development of an automated method for measuring of the flow time of a liquid in a tube with particulate material. This method is used for immersional wetting analysis with subsequent calculation of the contact angle. The source of information is a stream of digital images. To carry out the calculations an algorithm for image processing and analysis has been developed.

УДК 658.264

Алексахин А.А.¹, к.техн.н., доцент, Ена С.В.², ст. преподаватель, Гордиенко Е.П.²,
ст. преподаватель, Сыров М.В.³, студент, Фещенко Р.С.¹, студент

¹ Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

³ Украинский государственный университет железнодорожного транспорта,
г. Харьков

ОСОБЕННОСТИ УТЕПЛЕНИЯ ГРУПП ЗДАНИЙ ПРИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, энергосбережение, сопротивление теплопередаче, ограждающие конструкции, коэффициент эффективности утепления зданий, распределительные тепловые сети, потери теплоты трубопроводами, тепловая производительность отопительных приборов, система отопления.

Сложившаяся система централизованного теплоснабжения жилых микрорайонов предполагает наличие узлов управления тепловыми и гидравлическими режимами, называемыми теплораспределительными станциями (ТРС) или центральными тепловыми пунктами (ЦТП) [1]. Распределение горячей воды для хозяйственно-бытовых потребностей и теплоносителя для отопления зданий осуществляется от ЦТП по микрорайонным тепловым сетям. Трубопроводы систем отопления и горячего водоснабжения прокладывают бесканальным способом или в непроходных каналах. Расчет параметров теплоизоляции трубопроводов выполняют, исходя из условия обеспечения нормативных удельных потерь теплоты в окружающую среду [2].

Несоответствие фактического сопротивления теплопередаче строительных конструкций большинства эксплуатируемых зданий современным требованиям [3] обуславливает необходимость нанесения на ограждающие конструкции дополнительного слоя тепловой изоляции и замены окон. Поскольку утепление всех зданий микрорайона потребует значительных затрат средств и времени, в условиях ограниченности ресурсов может возникнуть вопрос об очередности утепления зданий. В работе [4] на примерах идеализированных групп зданий показано, что утепление наиболее удаленных от ЦТП объектов обуславливает меньшие потери теплоты в микрорайонных сетях в сравнении с вариантом утепления ближайших к ЦТП зданий. Однако, поскольку распределительные тепловые сети содержат, чаще всего, несколько ветвей, различающихся длиной, диаметром трубопроводов и тепловыми нагрузками, при формировании стратегии энергосбережения для микрорайонов возникает проблема первоначального выбора одной из ветвей сети.

Целью работы является оценка влияния характеристик ветвей отопительной сети на величину потерь теплоты при транспортировке теплоносителя.

Рассмотрены идеализированные группы зданий (рис. 1), схемы теплоснабжения которых имеют по две ветви. Варианты отличаются длинами ветвей и суммарной тепловой нагрузкой присоединенных зданий. Вычисления выполнены при расчетной для отопления температуре наружного воздуха. Расход теплоты для всех зданий одинаков и при указанных условиях равен 0,1 МВт. Температура воды в подающем трубопроводе на выходе из ЦТП в микрорайонную сеть равна 105 °С, на входе в систему отопления

зданий 95 °С, на виході из системи опoтoплення зданий 70 °С. Длина расчетных участков сети задана характерным размером $a=100$ м. Удельные теплотeтeри трубопроводами приняты по нормативам для прокладки в непроходных каналах (см. табл. 1). Теплотeтeри конструктивными элементами тепловой сети учтены коэффициентом $\beta=1,15$ [2]. Температура грунта на глубине заложения теплопроводов принята равной 5 °С.

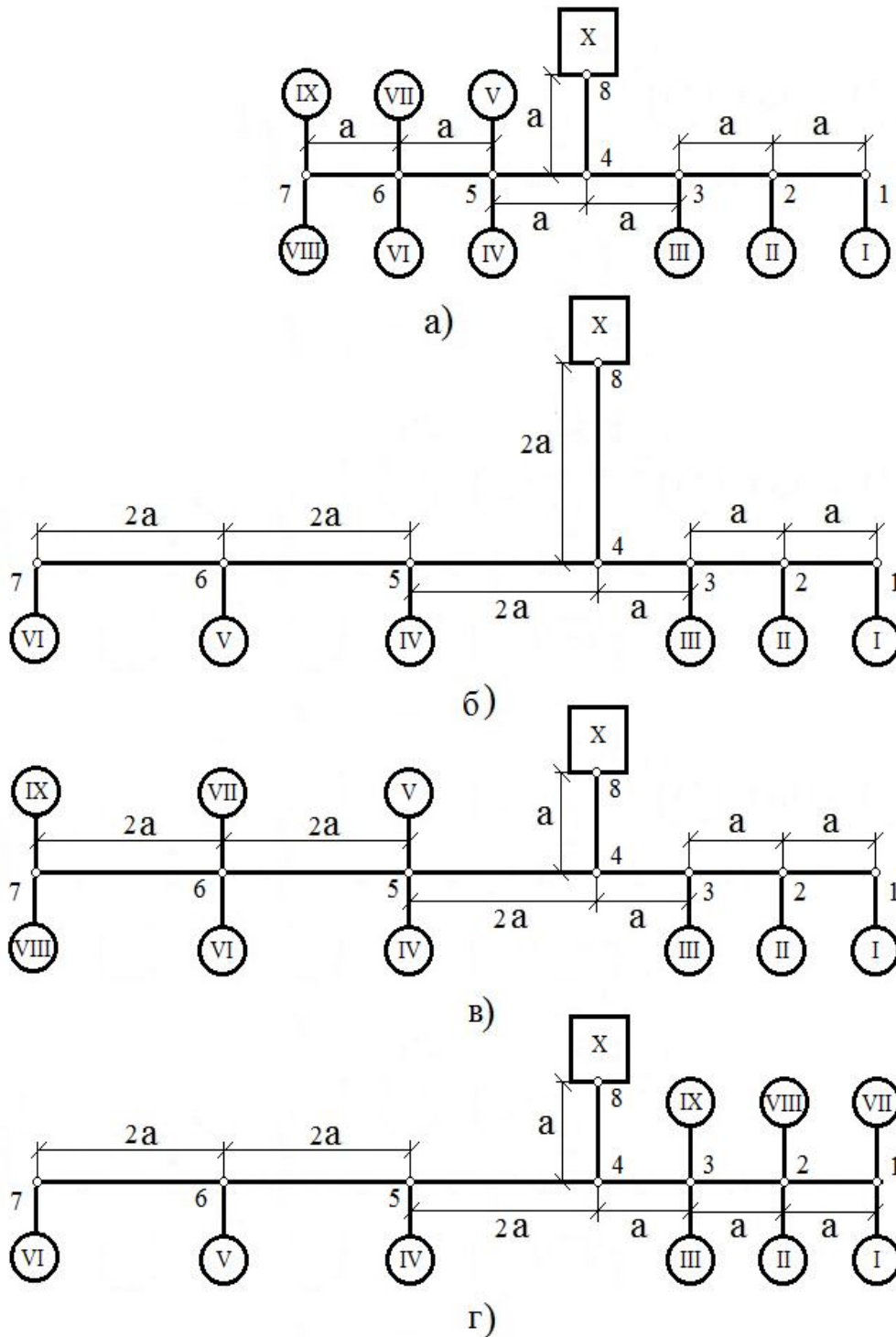


Рисунок 1 – Расчетные схемы отопительной сети
 I...IX – номера зданий; X – центральный тепловой пункт; 1–8 – расчетные точки

Потери теплоты на участках сети рассчитаны по формуле

$$Q_{yч} = q_{yч} \cdot l_{yч} \cdot \frac{\tau - t_{ГР}}{\tau_{НОР} - t_{ГР}} \cdot \beta, \quad (1)$$

где $q_{yч}$ – нормативные линейные (удельные) теплотери на участке подающего или обратного теплопровода; $l_{yч}$ – длина расчетного участка; $\tau_{НОР}$ – температура сетевой воды, при которой выполнена нормировка тепловых потерь теплоты через изоляцию; $t_{ГР}$ – температура грунта.

Таблица 1 – Линейные потери теплоты трубопроводами отопительной сети на участках[2]

Номера участков	Диаметр, мм	Теплотери q , Вт/м	
		подающий трубопровод (температура воды 95 °С)	обратный трубопровод (температура воды 50 °С)
(1-2), (7-6)	76	52	34
(2-3), (6-5)	108	63	40
(3-4), (5-4)	159	76	49
(4-8)	219	92	59

Температура сетевой воды в конце расчетного участка подающего трубопровода ($\tau_{ВЫХ}$) определена по формуле

$$\tau_{ВЫХ} = \tau_{ВХ} - \frac{Q_{yч}}{C \cdot G_{yч}}. \quad (2)$$

Вычисления по формулам (1), (2) выполнены итерационным способом, в несколько приближений. Температура сетевой воды в конце расчетного участка обратного трубопровода определена с учетом ее охлаждения на участке и смешения потоков воды на участке и из ответвлений к зданиям на данном участке. Теплотери трубопроводами ответвлений к зданиям не учитывались. Результаты расчетов потерь теплоты распределительными трубопроводами для рассмотренных схем теплоснабжения до утепления зданий представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Теплотери трубопроводами сети до утепления зданий (исходный вариант)

Расчетная схема (рис.1)	тепловая нагрузка, сети, МВт	общая длина участков, м	расход воды через ЦТП, кг/с	Теплотери, кВт		
				подающий трубопровод	обратный трубопровод	общие
а	0,9	700	9,27	63,68	50,23	113,91
б	0,6	1000	6,78	88,8	69,99	158,79
в	0,9	1000	9,56	89,18	70,38	159,76
г	0,9	1000	9,64	88,98	70,44	159,42

Эффективность применения энергосберегающих мероприятий оценивалась величиной

$$\mu = \frac{Q_{o.p.n.}}{Q_{o.p.}} \quad (3)$$

Определение показателей работы отопительного комплекса здания после утепления выполнено при условии, что присоединение системы отопления осуществлено по независимой схеме [1], с помощью теплообменного аппарата; температура теплоносителя на вводе в здание не зависит от эффективности утепления и определяется температурным графиком теплосети и охлаждением сетевой воды при ее транспортировке по микрорайону; гидравлический режим системы отопления здания до утепления и после одинаков.

Для нахождения температуры воды в отопительных приборах утепленного здания использованы уравнение теплопередачи отопительного прибора (4) и балансовое соотношение (5).

$$Q_O = K_O \cdot \Delta t_{np} \cdot F_O, \quad (4)$$

$$Q_O = G \cdot C \cdot (\tau_3 - \tau_2), \quad (5)$$

где Q_O – тепловой поток, передаваемый от сетевой воды к воздуху в помещениях; $\Delta t_{np} = 0,5 \cdot (\tau_3 + \tau_2) - t_{вн}$ – разница температур воды в отопительном приборе и внутреннего воздуха ($t_{вн}$); τ_3, τ_2 – температура сетевой воды на входе и выходе прибора соответственно; F_O – площадь отопительного прибора.

Коэффициент теплопередачи отопительного прибора можно определить из соотношения [5]

$$K_O = m \cdot (\Delta t_{np})^{n_1} \cdot \bar{G}^{n_2}, \quad (6)$$

где m – постоянный множитель, зависящий от конструктивных характеристик отопительных приборов; \bar{G} – относительный расход сетевой воды через прибор.

Показатели степени n_1 и n_2 для конкретного типа отопительного прибора являются постоянными величинами. Для радиаторов величина n_2 практически равна нулю. В дальнейших расчетах принято $n_1 = 0,2$; $n_2 = 0$.

Тепловую производительность отопительного прибора после утепления здания можно записать следующим образом

$$Q_{O.H} = \mu \cdot Q_O = K_{O.H} \cdot m \cdot (\Delta t_{np.H})^{0,2} = C \cdot G_H \cdot (\tau_{3H} - \tau_{2H}). \quad (7)$$

Индекс «н» в приведенных обозначениях характеризует «новые» условия теплопередачи после утепления.

В результате преобразований с учетом соотношений (4)-(6) получаем выражения для температуры сетевой воды на входе и выходе отопительного прибора в зависимости от величины коэффициента эффективности утепления здания μ

$$\begin{aligned} \tau_{3H} &= \left(\frac{\tau_3 + \tau_2}{2} - t_{BH} \right) \cdot \mu^{0,8} + (\tau_3 - \tau_2) \cdot \mu + t_{BH}, \\ \tau_{2H} &= \tau_{3H} - (\tau_3 - \tau_2) \cdot \mu. \end{aligned} \quad (8)$$

Принятые исходные значения (до утепления) температуры сетевой воды в отопительных приборах при расчетной температуре наружного воздуха составляют $\tau_3^P = 95$ °С (на входе) и $\tau_2^P = 70$ °С (на выходе). Результаты вычислений температуры сетевой воды для утепленных зданий приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Температура сетевой воды в отопительном приборе утепленного здания

Коэффициент эффективности утепления μ	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Расчетная температура сетевой воды:						
τ_{3H}^P	95	88,54	81,96	75,24	68,36	61,3
τ_{2H}^P	70	66,04	61,96	57,74	53,36	48,8

Расход воды из микрорайонной сети для отопления утепленного здания можно найти из уравнения теплового баланса (9) теплообменного аппарата независимой схемы присоединения системы отопления здания. Тепловой баланс записан для расчетной температуры наружного воздуха, в предположении, что температура греющей сетевой воды на выходе теплообменника на 10 °С выше температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления здания

$$G_O \cdot C \cdot \left[\tau_{CH}^P - (\tau_{2H}^P + 10) \right] = G_{OH} \cdot C \cdot (\tau_{3H}^P - \tau_{2H}^P), \quad (9)$$

где G_{OH} – расход воды через систему отопления утепленного здания; G_O – расход воды из тепловой сети; τ_{CH}^P – температура воды в подающем трубопроводе теплосети на вводе в здание.

При условии постоянства гидравлического режима системы отопления здания до утепления и после, т.е.

$$G_{O.P.} = \frac{Q_{O.P.}}{C \cdot (\tau_3^P - \tau_2^P)} = G_{OH} = \frac{\mu \cdot Q_{O.P.}}{C \cdot (\tau_{3H}^P - \tau_{2H}^P)}. \quad (10)$$

После преобразований получаем формулу для коэффициента расхода воды из наружных тепловых сетей для отопления утепленного здания

$$\beta = \frac{G_C(\mu)}{G_C(1)} = \frac{\mu \cdot [\tau_{1C}^P - (\tau_2^P + 10)]}{\tau_{1CH}^P - (\tau_{2H}^P + 10)}, \quad (11)$$

где τ_{1C}^P – температура сетевой воды при расчетной температуре наружного воздуха на вводе в систему отопления до утепления здания; τ_{1CH}^P – то же после утепления.

В работе принято, что коэффициент эффективности утепления отдельного здания составляет $\mu = 0,5$. Количество утепленных зданий для каждого из вариантов равно трем, утепляемые здания равномерно распределены по ветви. Результаты расчетного определения изменения параметров гидравлического и теплового режимов сетей приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Характеристики тепловых сетей при утеплении зданий

Расчетная схема (рис.1)	Характеристика мероприятия	изменение показателей в сравнении с исходным вариантом, %			
		расход	теплотери		
			подающий трубопровод	обратный трубопровод	общие
а	Утепление зданий менее нагруженной ветви	-17,3	-0,7	-14,35	-6,7
	Утепление зданий более нагруженной ветви	-16,9	-0,08	-3,48	-1,6
б	Утепление зданий ко- роткой ветви	-33,2	-0,68	-10,9	-5,2
	Утепление зданий длин- ной ветви	-37,2	-1,8	-21,4	-10,4
в	Утепление зданий ко- роткой менее нагружен- ной ветви	-23,6	-0,6	-10,5	-4,96
	Утепление зданий длин- ной более нагруженной ветви	-23,7	-0,31	-4,4	-2,1
г	Утепление зданий ко- роткой более нагружен- ной ветви	-22,2	-0,13	-7,09	-3,2
	Утепление зданий длин- ной менее нагруженной ветви	-27,8	-2,2	-21	-10,7

Поскольку рассмотренные варианты не охватывают всех возможных комбинаций соотношений длин, тепловых нагрузок, степени эффективности утепления каждого отдельного здания и снижения тепловой нагрузки ветви в целом, полученные рекомендации имеют предварительный характер. Обоснование варианта стратегии энергосбережения в микрорайоне необходимо выполнить для каждой группы зданий отдельно, с учетом конкретных параметров теплоснабжения, характеристик сети, располагаемых финансовых и технических ресурсов, определяющих объемы выполняемых за год работ по утеплению зданий.

Выводы

При одинаковой длине ветвей системы, но различных исходных тепловых нагрузках утепление зданий менее нагруженной ветви обуславливает меньшие потери теплоты трубопроводами сети.

Для варианта с одинаковой тепловой нагрузкой ветвей различной длины предпочтительнее первоначальное утепление зданий присоединенных к более протяженной ветви.

При наличии в системе ветвей с различными длинами и тепловыми нагрузками предпочтительнее утепление зданий менее нагруженной ветви.

Литература

1. Н.М. Зингер Повышение эффективности работы тепловых пунктов / Зингер Н.М., Бестолченко В.Г., Жидков А.А. – М.: Стройиздат, 1990. – 185 с.
2. Тепловая изоляция. Справочник строителя / Под ред. Г.Ф. Кузнецова – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
3. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013: чинний від 01.10.2013.: – К.: Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2013. – 167с.
4. Алексахін О.О. Аналіз теплових втрат трубопроводами розгалуженої опалювальної мережі з урахуванням можливого зниження розрахункового опалювального навантаження будівель / Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, – 2013. – № 8(114).
5. В.Е. Козин Теплоснабжение / Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П.. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.

Bibliography (transliterated)

1. N.M. Zinger Povyishenie effektivnosti raboty teplovyih punktov / Zinger N.M., Bestolchenko V.G., Zhidkov A.A. – M.: Stroyizdat, 1990. – 185 p.
2. Teplovaya izolyatsiya. Spravochnik stroitelya / Pod red. G.F. Kuznetsova – M.: Stroyizdat, 1982. – 336 p.
3. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia: DBN V.2.5-67:2013: chynnyi vid 01.10.2013.: – K.: Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy, 2013. – 167 p.

4. Aleksakhin O.O. Analiz teplovykh vtrat truboprovodamy rozghaluzhenoi opaliuvalnoi merezhi z urakhuvanniam mozhyvoho znyzhennia rozrakhunkovoho opaliuvalnoho navantazhennia budivel / Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit, – 2013. – № 8 (114).

5. V.E. Kozin Teplosnabzhenie / Kozin V.E., Levina T.A., Markov A.P. – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 408 p.

УДК 658.264

Алексахін О.О.¹, к.техн.н., доцент, Єна С.В.², ст. викладач, Гордієнко О.П.², ст. викладач, Сиров М.В.³, студент, Фещенко Р.С.¹, студент

¹ Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

³ Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

ОСОБЛИВОСТІ УТЕПЛЕННЯ ГРУП БУДІВЕЛЬ ПРИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОМУ ТЕПЛОПОСТАЧАННІ

Наведено результати обчислень втрат теплоти прокладеними підземно трубопроводами опалювальної мережі ідеалізованих груп будівель. Проаналізовано вплив співвідношення навантажень і довжин гілок розгалуженої мережі на тепловий стан теплопроводів.

Aleksakhin O.O., Yena S.V., Hordiienko O.P., Syrov M.V., Feshchenko R.S.

FEATURES OF BUILDING GROUP INSULATING CONSIDERING CENTRAL DISTRICT HEATING

The branched heating network of idealized groups of buildings is considered. The results of heat losses calculation for underground pipelines of given network are presented. The influence of heat loads and branches lengths and its relation on the heating pipelines thermal state is analyzed.

УДК 622.276.6:661.96:532.528

Кравченко О.В., д.т.н., Суворова И.Г., д.т.н., проф.,
Баранов И.А., канд. физ.- мат. наук, Велигоцкий Д.А.

Институт проблем машиностроения им. А.М. Подгорного НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ "ТРЕЩИНА ГОРНОЙ ПОРОДЫ – ФЛЮИД"

Ключевые слова: водород, горная порода, флюид, математическое моделирование.

Введение. Производительность нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин определяется качеством состояния призабойной зоны пласта (ПЗП), которое характеризуется главным образом его проницаемостью, то есть способностью фильтровать к забою скважины добываемые углеводороды. ПЗП представляет собой пористую или трещиноватую горную породу, через которую фильтруются углеводороды или технологические жидкости. Практически все пласты, представленные такими породами как пески, песчаники, карбонаты, доломиты, глины, обладая достаточно высокой пористостью, имеют невысокую естественную проницаемость, при которой через породу возможна фильтрация, как правило, только газа, и то, при большом пластовом давлении. Естественная проницаемость продуктивного пласта, как правило, ухудшается еще на стадии первичного вскрытия (во время бурения и обсаживания) за счет механической коагуляции призабойной зоны скважины буровыми и цементирующими растворами. В период всего срока эксплуатации скважины происходит загрязнение ПЗП продуктами разрушения пласта и асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО), что приводит к дальнейшему снижению проницаемости продуктивного пласта. Все вышеперечисленные факторы влияют на качество фильтрационных свойств ПЗП, нарушают гидродинамическую связь продуктивного пласта со скважиной и часто приводят к полному отсутствию дебита углеводородов.

В настоящее время существуют различные технологии восстановления и повышения производительности, как отдельных скважин, так и всего месторождения. Большая часть таких технологий основана на различных видах физического и химического воздействия на пласт. Это тепловые, кислотные, щелочные обработки или их комбинации. Эффективное применение этих технологий требует максимально полного представления о гидродинамических и тепловых процессах, происходящих при фильтрации флюидов в поровом пространстве породы продуктивного горизонта. Поэтому, компьютерное моделирование данных процессов чрезвычайно актуально как на стадии подготовки к проведению технологических операций, так и при интерпретации их результатов.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В ИПМаш НАН Украины разработана технология комплексного водородного и термобарохимического воздействия (КВТБХВ) на призабойную зону продуктивного пласта скважины [1, 2], в ходе реализации которой осуществляется интегрированное многофакторное физико-химическое воздействие на призабойную зону пласта, направленное на устранение в

течение одной обработки всех основных причин кольматации, а также улучшение фильтрационной способности коллектора.

При реализации КВТБХВ выделяются различные активные жидкости и газы (в том числе водород), которые задавливаются в продуктивный пласт [2–4]. Экспериментально показано, что наличие водорода в составе таких газов приводит к значительному улучшению их фильтрационной способности через керны горной породы. С точки зрения теории фильтрации это объясняется более низкой вязкостью водорода по сравнению с другими «рабочими газами» (N_2 , NO , NO_2 , CO , CO_2) [5] и более высоким коэффициентом его кнудсеновской диффузии [6].

Исследовались цилиндрические образцы уплотненных карбонатных и песчаных кернов нефтяных и газоконденсатных скважин, имеющие очень низкие показатели газопроницаемости по воздуху (0.02–0.03 мкм²). Задачей исследований являлось определение активационного влияния на диффузионные свойства кернов как молекулярного и атомарного водорода, так и его композиции с другими газами. Хроматографический анализ газа из камеры отбора проб показал, что ни один из компонентов не фильтруется через керны, даже при перепаде давления в 2,5 МПа. При введении в модельную газовую смесь водорода из баллона до 5 % об., фильтруется только водород, а с повышением его концентрации до 10 % об. начинают фильтроваться другие составные элементы модельного газа.

Исследования показали, что в присутствии водорода, полученного в генераторе путем гидролиза гидрореагирующих составов (ГРС), наблюдается начальная фильтрация водорода через керн уже при его объемных концентрациях около 3–4 %, а начало фильтрации элементов модельного газа происходит при концентрации водорода 7–8 %. Это подтверждает большую диффузионную активность молекулярного и атомарного водорода, полученного путем химической реакции. Исследования также показали, что после такого водородного термогазового воздействия у обработанных кернов наблюдалось увеличение остаточной проницаемости.

Анализ результатов промысловых испытаний технологии КВТБХВ в реальных нефтяных и газовых скважинах также подтвердил, что наличие водорода в смеси газа при термогазохимическом воздействии на призабойную зону существенно увеличивает радиус ее тепловой и химической обработки.

Для дальнейшего повышения эффективности применения технологии, совершенствования регламента ее использования в скважинах с различными геолого-физическими параметрами, в том числе в продуктивных горизонтах с различной пористостью, трещинноватостью и проницаемостью, необходим учет эффекта влияния водорода на течение и теплообмен в системе "трещина горной породы – флюид". В настоящее время экспериментальные методы исследования сделать это не позволяют.

Проведение численного компьютерного моделирования также сопряжено с рядом сложностей. Это связано с тем, что отличительной особенностью пористых систем является неупорядоченность их структуры. Решение полной системы уравнений Навье-Стокса для моделирования течения вязкой жидкости в неупорядоченных системах не представляется возможным, так как сопряжено со многими вычислительными трудностями. Прежде всего, это связано с тем, что решение задачи необходимо проводить на сетках очень большой размерности для учета сложной геометрии пористой среды, а также необходимостью получения математической модели пористого тела. Кроме того, полученное решение будет корректным только для одного конкретного течения [7, 8]. Для обобщения таких результатов на определенные классы литотипов пород с похожи-

ми петрографіческими параметрами применяется фрактальный анализ трехмерной микроструктуры пористых материалов [9].

В теоретических исследованиях течений в пористых средах часто используется теория фильтрации [10–14]. При этом производится замена описания реальной пористой среды упрощенными упорядоченными моделями с эквивалентными гидравлическими свойствами. Поэтому применение теории фильтрации не дает возможность разобраться в особенностях фильтрационного течения флюида, в том числе, в механизме увеличения остаточной проницаемости кернов. Одним из путей исследования таких процессов являются экспериментальные исследования трехмерных течений в пористых средах с использованием компьютерной томографии [15].

Цели и задачи исследований. Целью работы является теоретическое исследование процесса водородной активации процессов диффузии и фильтрации флюидов в поровом пространстве горной породы с применением математического моделирования гидродинамики и теплообмена в системе "трещина горной породы – флюид".

Для достижения цели поставлены следующие задачи исследований:

- разработать методологию математического моделирования течения в отдельной трещине горной породы с применением структурного метода R-функций;
- осуществить постановку решения сопряженной задачи теплообмена в системе "флюид - горная порода" с учетом водородной активации диффузии и фильтрации;
- выполнить компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в системе "трещина горной породы – флюид", провести анализ полученных результатов;
- провести верификацию теоретических и экспериментальных исследований.

Математическое моделирование задач в системе «трещина горной породы – флюид». Подавляющая часть продуктивных коллекторов нефтяных и газовых месторождений имеет гранулярную, трещинную и смешанную структуру. В чисто трещиноватых коллекторах (преимущественно карбонатных) поровое пространство образуется системой трещин. При этом участки коллектора между трещинами представляют собой плотные малопроницаемые нетрещиноватые блоки пород, поровое пространство которых практически не участвует в процессах фильтрации. На практике, однако, чаще всего встречаются трещиноватые коллекторы смешанного типа, поровое пространство которых включает как системы трещин, так и поровое пространство блоков, а также каверны и карсты.

В работе представлена методология численного моделирования гидродинамики и теплообмена в системе «трещина горной породы – флюид» в процессе увеличения проницаемости закольматированной призабойной зоны трещинного коллектора после термобарохимической обработки. Численные исследования проведены на примере плоского канала, моделирующего протяженную трещину с сужением, в котором происходит понижение давления в потоке флюида с локальным увеличением скорости движения [16]. Для исследования процесса прогрева порового пространства решается сопряженная задача, в такой постановке: гидродинамическая задача в канале и задача теплопроводности в горной породе.

Математическое моделирование гидродинамической задачи. Используя разработанную методику математического моделирования движения вязкой несжимаемой жидкости в каналах сложной формы с помощью метода R – функций [17–19], выполнена постановка и решена задача стационарного движения жидкости в канале, область Ω ,

котрого представлена на рис. 1. Граница області $\partial\Omega = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$, где Γ_3 – вход в канал, Γ_4 – выход из канала, Γ_1, Γ_2 – твердые стенки.

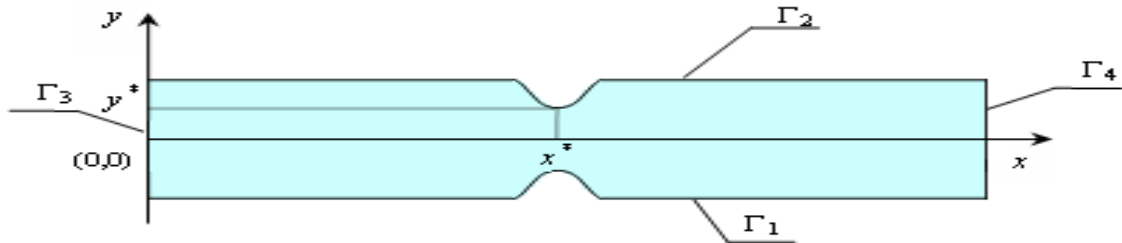


Рисунок 1 – Область Ω

Участки границы Γ_i описываются уравнениями $f_i = 0$, где

$$f_1 = \frac{-y - (a - y^*)e^{-x^*(x-x^*)^2} + a}{\sqrt{1 + (a - y^*)^2 4x^{*2}(x - x^*)^2 e^{-2x^*(x-x^*)^2}}}; f_2 = \frac{y - (a - y^*)e^{-x^*(x-x^*)^2} + a}{\sqrt{1 + (a - y^*)^2 4x^{*2}(x - x^*)^2 e^{-2x^*(x-x^*)^2}}};$$

$f_3 = x$; $f_4 = b - x$; a – половина ширины входа в канал; b – длина канала; x^* – точка минимальной ширины канала; y^* – половина минимальной ширины канала.

Плоское стационарное движение вязкой несжимаемой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса, которая сведена к нелинейному дифференциальному уравнению в частных производных 4-го порядка относительно функции тока ψ [17–19].

$$\frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \psi - \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Для описания движения жидкости в канале необходимо задать граничные условия. При исследовании изменения проницаемости кернов горной породы в качестве граничных условий, которые учитывают увеличение проницаемости под влиянием водорода, необходимо задать различные расходы сплошной среды. Экспериментальные данные [4] показывают, что в пластовых условиях скорость течения рабочих газов с водородом в 5–10 раз выше, чем без водорода. В безразмерном виде это соответствует различным числам Рейнольдса. Для движения рабочих газов в поровом пространстве характерными числами Рейнольдса, являются числа порядка 1. Для примера рассмотрим задачу при числе Рейнольдса 1 (без водорода) и 10 (с водородом).

Решение краевой задачи для уравнения (1) с соответствующими граничными условиями ищется в виде $\psi = \psi_1 + \psi_0$, где ψ_0 – функция, которая удовлетворяет неоднородным краевым условиям задачи, ψ_1 – функция с нулевыми граничными условиями Дирихле и Неймана. Структура решения для функции ψ_1 имеет вид $\psi_1 = \omega_1^2 P_{1,k}$, где $P_{1,k}$ – неопределенная компонента структуры, $\omega_1(x, y) = (f_1 \wedge f_2) \wedge f_3$.

Структура решения для уравнения (1) с соответствующими граничными условиями имеет вид [8,18–20]

$$P = P_{2,k} \omega_2 - \omega \left(\frac{\partial \omega_1}{\partial x} \frac{\partial (P_{2,k} \omega_2)}{\partial x} + \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \frac{\partial (P_{2,k} \omega_2)}{\partial y} \right) - \omega \varphi + \omega_1^2 \omega_2 P_{3,k} + C,$$

где ω , ω_1 , ω_2 – нормализованные функции [19], описывающие всю границу области, границу области без участка Γ_4 и участок границы Γ_4 соответственно; φ – функция:

$$\varphi|_{\Gamma_i} = \frac{\partial P}{\partial n}|_{\Gamma_i}, \quad i=1, 2, 3; \quad P_{1,k}(x, y), P_{2,k}(x, y) – \text{неопределенная компонента структуры; } C$$

– значение статического давления на входе.

Для рассматриваемой задачи построим функции ω , ω_1 , ω_2 в виде

$$\omega_1 = \left(f_1 \wedge_0^\alpha f_2 \right) \wedge_0^\alpha (f_3), \quad \omega = \left(f_1 \wedge_0^\alpha f_2 \right) \wedge_0^\alpha \left(f_3 \wedge_0^\alpha f_4 \right), \quad \omega_2 = (b - x),$$

где конъюнкция [21] представлена формулой $x \wedge_0^\alpha y = x + y - \sqrt{x^2 + y^2 + \alpha_k(x, y)}$,

$$\alpha_k(x, y) = \begin{cases} \bar{b} \left(1 - \left(\frac{x}{\bar{a}} \right)^2 - \left(\frac{y}{\bar{a}} \right)^2 \right)^{k+1}, & x^2 + y^2 < \bar{a}^2, \\ 0, & x^2 + y^2 \geq \bar{a}^2. \end{cases}$$

Неизвестные компоненты структуры имеют вид $P_{l,k}(x, y) = \sum_{i=1}^k c_{l,i} \varphi_i(x, y)$, где $l = 1, 2$, $\{\varphi_i(x, y)\}$ – базисные сплайны 5-го порядка, $\{c_{l,i}\}$, $i = 1, \dots, k$, $l = 1, 2$ – константы, которые необходимо определить.

Функцию φ : $\varphi|_{\Gamma_i} = \frac{\partial P}{\partial n}|_{\Gamma_i}$, $i=1, 2, 3, 4$ построим с использованием формулы

склейки [20] $\varphi = \frac{\sum_{i=1}^3 \varphi_i}{\sum_{i=1}^3 f_i}$, где $\varphi_i = 0$, $i = 1, 2$, $\varphi_3 = \frac{8}{\text{Re } a^2}$, $\bar{w}_1 = a - y$.

Решение ищется методом наименьших квадратов.

Для численных расчетов были выбраны такие параметры: $a = 1$, $b = 10$, $d = 1$, $x^* = 5$, $y^* = 0,5$, $\bar{a} = 0.01$, $\bar{b} = 1.312 \times 10^{-5}$, $k = 3$, $C = 0$.

На рисунках 2 – 5 приведены графики функций тока и модуля скорости в виде линий постоянного уровня на плоскости xOy для чисел Рейнольдса 1 и 10. Вычислительные эксперименты проводились на сетке 32×32 сплайнами 5-го порядка. Для данных задач сходимость достигалась при 4 итерациях (максимум модуля разности решений, полученных на 4-й и 5-й итерациях, составила $\varepsilon < 10^{-4}$).

Re = 1 (без водорода)



Рисунок 2 – Функція тока

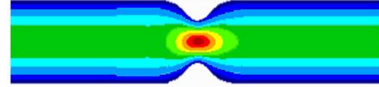


Рисунок 3 – Функція модуля швидкості

Re = 10 (с водородом)

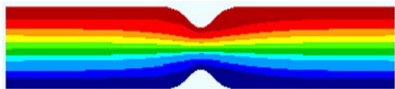


Рисунок 4 – Функція тока

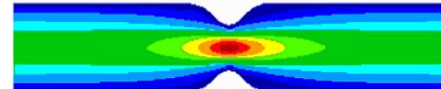


Рисунок 5 – Функція модуля швидкості

Моделирование температурных полей в системе "трещина горной породы – флюид". Анализ полученных результатов. Решив задачу течения жидкости, необходимо решить сопряженную задачу теплопроводности в околопоровом пространстве [22, 23]. Поскольку постановка задачи симметричная, то достаточно рассмотреть половину области трещины, изображенной на рис. 6.

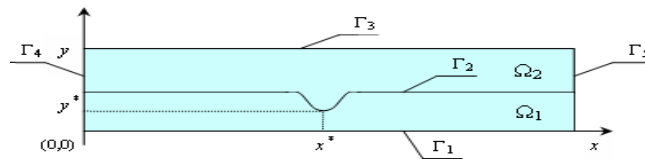


Рисунок 6 – Область решения задачи

Постановка задачи. Найти функцию, из системы [24]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T_1}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha_1 \Delta T_1, & x \in \Omega_1, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \Delta T_2, & x \in \Omega_2. \end{cases}$$

Рассмотрим граничные условия для этой задачи.

На Γ_1 : $\frac{\partial T_1}{\partial n} = 0$ (условие симметрии). На Γ_2 : $\frac{\partial T_1}{\partial n_1} = -\frac{\partial T_2}{\partial n_2} = \lambda(T_2 - T_1)$.

На Γ_3 : $\frac{\partial^2 T_2}{\partial n^2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t}$ (условие на бесконечности).

На Γ_4 : $\frac{\partial T_1}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial T_2}{\partial n} = 0$. На Γ_5 : $\frac{\partial T_1}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial T_2}{\partial n} = 0$.

Для решения этих уравнений используется метод конечных разностей, схема – «классики» [25]. Искомые функции T_1 и T_2 заменяются сеточными функциями $T_1^{n,i,j}$ и $T_2^{n,i,j}$ [25 – 27]. Схема «классики» состоит из двух последовательных проходов по всей расчетной области. При первом проходе величины $T_1^{n+1,i,j}$ и $T_2^{n+1,i,j}$ рассчитываются в тех узлах сетки, где $(i + j + n)$ – четное число по схемам:

$$\frac{T_1^{n+1,i,j} - T_1^{n,i,j}}{\Delta t} + \frac{\bar{\delta}_x T_1^{n,i,j}}{\Delta x} \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j} - \frac{\bar{\delta}_y T_1^{n,i,j}}{\Delta y} \frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i,j} = \alpha_2 \left(\frac{\delta_x^2 T_1^{n,i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\delta_y^2 T_1^{n,i,j}}{\Delta y^2} \right),$$

$$\frac{T_2^{n+1,i,j} - T_2^{n,i,j}}{\Delta t} = \alpha_2 \left(\frac{\delta_x^2 T_2^{n,i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\delta_y^2 T_2^{n,i,j}}{\Delta y^2} \right).$$

При втором проходе величины $T_1^{n+1,i,j}$ и $T_2^{n+1,i,j}$ рассчитываются в тех узлах сетки, где $(i + j + n)$ – нечетное число по схемам:

$$\frac{T_1^{n+1,i,j} - T_1^{n,i,j}}{\Delta t} + \frac{\bar{\delta}_x T_1^{n+1,i,j}}{\Delta x} \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j} - \frac{\bar{\delta}_y T_1^{n+1,i,j}}{\Delta y} \frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i,j} = \alpha_2 \left(\frac{\delta_x^2 T_1^{n+1,i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\delta_y^2 T_1^{n+1,i,j}}{\Delta y^2} \right),$$

$$\frac{T_2^{n+1,i,j} - T_2^{n,i,j}}{\Delta t} = \alpha_2 \left(\frac{\delta_x^2 T_2^{n+1,i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\delta_y^2 T_2^{n+1,i,j}}{\Delta y^2} \right).$$

Данная схема является абсолютно устойчивой [25]. Погрешность аппроксимации $O(\Delta t, (\Delta x)^2, (\Delta y)^2)$.

На рисунках 7 и 8 представлены распределение функции T_2 – температуры в горной породе, формирующей трещину, где функция ψ является решением краевой задачи для дифференциального уравнения (1) при $Re = 1$ и $Re = 10$.

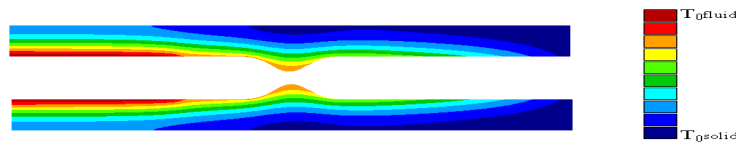


Рисунок 7 – Распределение температуры в горной породе при течении рабочих газов без водорода ($Re = 1$)

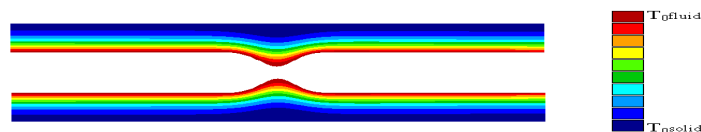


Рисунок 8 – Распределение температуры в горной породе при течении рабочих газов с водородом ($Re = 10$)

Полученные результаты компьютерного моделирования наглядно объясняют повышение эффективности термобарохимической обработки в случае присутствия водорода в рабочих газах (рис. 8). При этом, за счет увеличения скорости фильтрации, за один и тот же промежуток времени горячие газы с водородом успевают проникать в призабойную зону дальше, перенося и расходуя теплоту в основном на интенсивный прогрев внутренней поверхности трещин и кольматантов на большем расстоянии от скважины. В конечном итоге, такой процесс более эффективно реализует термохимический потенциал и способствует эффективной очистке призабойной зоны. В случае отсутствия водорода тепловой потенциал рабочих газов в большей мере используется на прогрев горной породы (рис. 7) вблизи скважины и меньше на внутрискважинное пространство. При более интенсивном прогреве поверхностей порового пространства, кольматанты, легче удаляются из порового пространства, благодаря чему увеличивается и остаточная проницаемость.

Выводы. Представлена методология математического моделирования гидродинамики и теплообмена в системе "трещина горной породы – флюид" с применением структурного метода R-функций, который позволяет точно учитывать геометрическую информацию о форме области и граничные условия. Математические модели построены на основе системы уравнений Навье-Стокса, которые в плоском случае сведены к нелинейному дифференциальному уравнению в частных производных 4-го порядка относительно функции тока и уравнению Пуассона относительно статического давления.

Выполнена постановка решения сопряженной задачи теплообмена в системе "флюид–горная порода", в том числе, с учетом водородной активации диффузии и фильтрации.

Компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в системе "трещина горной породы – флюид" показало, что за счет увеличения скорости фильтрации, за один и тот же промежуток времени горячие газы с водородом успевают проникать в призабойную зону дальше, перенося и расходуя теплоту в основном на равномерный и интенсивный прогрев внутренней поверхности трещин и кольматантов на большем расстоянии от скважины.

В случае отсутствия водорода, снижается эффективность химико-технологического процесса, так как тепловой потенциал рабочих газов в большей мере используется на прогрев горной породы и флюидов вблизи скважины и меньше на внутрискважинное пространство всей призабойной зоны, то есть, уменьшается радиус термогазохимической обработки призабойной зоны продуктивного горизонта.

Проведенные исследования кернов горных пород подтвердили, что водород является активатором процесса диффузии в кернах продуктивных пластов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают определяющую роль водорода как активатора процессов диффузии и фильтрации флюидов в поровом пространстве горной породы в технологии комплексного водородного термобарохимического воздействия на призабойную зону продуктивных горизонтов с целью интенсификации добычи нефти, газа, газового конденсата.

Литература

1. Пат. 102501, Україна, МПК E21B 43/24 (2006.01), E21B 43/25 (2006.01). Спосіб комплексного водневого та термобарохімічного впливу на привибійну зону продуктивного пласта / О.В. Кравченко, Д.О. Велигоцький, Ю.М. Мацевитий, О.В.

Сімбірський; заявник і патентотримувач Науково-технічний концерн “Інститут проблем машинобудування” НАН України.– № а 2013 03001; заяв. 11.03.2013; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 23.

2. Кравченко О.В. Водородная активация в процессах повышения проницаемости нефтегазоносных пород / О.В. Кравченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2013.– № 1/6 (61).– С. 21–25.

3. Кравченко О.В. Физическое моделирование тепломассообмена при термохимической водородной обработке призабойной зоны пласта нефтяной или газовой скважины / О.В. Кравченко, Д.А. Велигоцкий, В.Б. Пода // Інтегровані технології та енергозбереження.– 2013.– № 1.– С. 27–35.

4. Кравченко О.В. Применение водорода в химических и термохимических технологиях интенсификации добычи углеводородов/ О.В. Кравченко // Промышленность Казахстана.– 2013.– № 6 (81).– С. 58–62.– ISSN 1608-8425.

5. Шпильрайн Э.Э. Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов.–М.: Энергоатом-издат, 1984.– 264 с.

6. Абрамов Ю.А. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей.– Харьков: Фолио, 2002.– 369 с.

7. Баранов И.А. Метод R-функций для расчета взаимосвязанных полей в гидротоках / И.А. Баранов, О.В. Кравченко, И.Г. Суворова // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»– Харьков: ХНУ, 2007.– № 780.– С. 9–18.

8. Баранов И.А. Расчет гидродинамических характеристик потока вязкой несжимаемой жидкости методом R-функций / И.А. Баранов, О.В. Кравченко, И.Г. Суворова // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління».– Харьков: ХНУ, 2008.– № 809.– С. 9–19.

9. (2015) Peng Xu, Jianchao Cai, Agus Pulung Sasmito, Sachin Vinayak, & Boming Yu. Transport Phenomena in Porous Media and Fractal Geometry/ Journal of Chemistry. Volume 2015, Article ID 486501, 2 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/486501>.

10. Басниев К.С. Современные нефтегазовые технологии. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов.– М.: Издательство: «Институт компьютерных исследований» (2006).– 488 с. ISBN: 5-93972-547-3.

11. Баренблатт Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик.– М.: Недра, 1984.– 211 с.

12. (2006) Clifford K. Ho, Stephen W. Webb. Gas Transport in Porous Media / Theory and Applications of Transport in Porous Media. Book series.– Springer.– 444 p.

13. (2012) M. Kaviany. Principles of Heat Transfer in Porous Media / Mechanical engineering series. Springer-Verlag New York Inc., – 646 p. ISBN-10: 1468404148, ISBN-13:978146804142.

14. (2015) Kambiz Vafai. Handbook of porous media/CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.– 959 p. ISBN 9781439885543 – CAT#K13996.

15. (2015) Peng Xu, Jianchao Cai, Agus Pulung Sasmito, Sachin Vinayak, & Boming Yu. Transport Phenomena in Porous Media and Fractal Geometry/ Journal of Chemistry. Volume 2015, Article ID 486501, 2 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/486501>.

16. (2017) Lihua Zuo and Ruud Weijermars. Rules for Flight Paths and Time of Flight for Flows in Porous Media with Heterogeneous Permeability and Porosity/ Geofluids. Volume 2017 (2017), Article ID 5609571, 18 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/5609571>.

17. (2012) Suvorova I.G. Mathematical and computer modeling of axisymmetric flows of an incompressible viscous fluid by the method of R-functions / I. G. Suvorova, O. V. Kravchenko, I. A. Baranov // Journal of Mathematical Sciences. Springer US, 2012.– Vol. 184.– No. 2.– pp. 165–180.
18. (2017) Suvorova I.G. Investigating the hydrodynamics of flows in channels of complex geometric forms // International Conference Differential Equations, Mathematical Physics and Applications, October 17 – 19, 2017, Cherkasy, Ukraine. Book of Abstracts.– Vinnytsia: Vasyl' Stus Donetsk National University, 2017.– 84–85p.
19. (2017) Kravchenko, O., Suvorova, I., Baranov, I., Goman, V. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kravchenko O. /О. Кравченко, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, 4 /5 (88), P. 33–42.
20. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения./ В.Л. Рвачев.– К.: Наук. Думка, 1982.– 552 с.
21. Баранов И.А. Новые R-операции различного класса гладкости для построения базисов краевых задач / И.А. Баранов // Вестник Запорожского национального университета, серия физико-математические науки.– Запорожье: ЗНУ, 2011.– № 2.– С. 13–28.
22. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков.– М.: Высшая школа, 1967.– 423 с.
23. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена /С.С. Кутателадзе.– М.: Атомиздат, 1979.– 416 с.
24. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский.– М.: Дрофа, 2003.– 840 с.
25. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т.1. / Д. Андерсен, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер.– М.: Мир, 1990.– 384 с.
26. Chung T.J. Computational Fluid Dynamics / T.J. Chung.– Cambridge: University Press, 2002.– 1012 p.
27. Wesseling P. Principles of Computational Fluid Dynamics /P.Wesseling.– Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.– 644 p.
28. Kutia M. Improvement of technological mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field / M. Kutia, M. Fyk, O. Kravchenko, S. Palis, I. Fyk// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.– 2016.– Vol. 5/8(83).– P. 40–48.

Bibliography (transliterated)

1. Pat. 102501, Ukrayina, МПК E21B 43/24 (2006.01), E21B 43/25 (2006.01). Sposib kompleksnogo vodneвого ta termobarohimichnogo vplivu na privibiynu zonu produktivnogo plasta / O.V. Kravchenko, D.O. Veligotskiy, Yu.M. Matsevityi, O.V. Simbirskiy; zayavnik i patentoutrimuvach Naukovo-tehnichniy kontsern “Institut problem mashinobuduvannya” NAN Ukrayini.– # a 2013 03001; zayav. 11.03.2013; opubl. 10.07.2013, Byul. # 23.
2. Kravchenko O.V. Vodorodnaya aktivatsiya v protsessah povyisheniya pronitsaemosti neftegazonosnyih porod / O.V. Kravchenko // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal передовийih tehnologiy.– 2013.– # 1/6 (61).– P. 21–25.
3. Kravchenko O.V. Fizicheskoe modelirovanie teplomassoobmena pri termohimicheskoy vodorodnoy obrabotke prizaboynoy zonyi plasta neftyanoy ili gazovoy

skvazhiny / O.V. Kravchenko, D.A. Veligotskiy, V.B. Poda // *Integrovani tehnologiyi ta energo-zberezhennya.*– 2013.– # 1.– P. 27

4. Kravchenko O.V. *Primenenie vodoroda v himicheskikh i termohimicheskikh tehnologiyah intensivatsii dobyichi uglevodorodov/ O.V. Kravchenko // Promyishlennost Kazahstana.*– 2013.– # 6 (81).– P. 58–62.– ISSN 1608-8425.

5. Shpilrayn E.E. *Vvedenie v vodorodnyuyu energetiku / E.E. Shpilrayn, S.P. Malyishenko, G.G. Kuleshov.*–M.: Energoatom-izdat, 1984.– 264 p.

6. Abramov Yu.A. *Sistemyi hraneniya i podachi vodoroda na osnove tverdykh veschestv dlya bortovykh energeticheskikh ustanovok / Yu.A. Abramov, V.I. Krivtsova, V.V. Solovey.*– Harkov: Folio, 2002.– 369 p.

7. Baranov I.A. *Metod R-funktsiy dlya rascheta vzaimosvyazannykh poley v gidropotokakh / I.A. Baranov, O.V. Kravchenko, I.G. Suvorova // Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu. Seriya «Matematichne modelyuvannya. Informatsiyi tehnologiyi. Av-tomatizovani sistemi upravlinnya»*– Harkov: HNU, 2007.– # 780.– P. 9–18.

8. Baranov I.A. *Raschet gidrodinamicheskikh karakteristik potoka vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti metodom R-funktsiy / I.A. Baranov, O.V. Kravchenko, I.G. Suvorova // Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu. Seriya «Matematichne modelyuvannya. Informatsiyi tehnologiyi. Avtomatizovani sistemi upravlinnya».*– Harkov: HNU, 2008.– # 809.– P. 9–19.

9. (2015) Peng Xu, Jianchao Cai, Agus Pulung Sasmito, Sachin Vinayak, & Boming Yu. *Transport Phenomena in Porous Media and Fractal Geometry/ Journal of Chemistry.* Volume 2015, Article ID 486501, 2 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/486501>.

10. Basniev K.S. *Sovremennyye neftegazovyye tehnologii. Podzemnaya gidromekhanika / K.S. Basniev, N.M. Dmitriev, R.D. Kanevskaya, V.M. Maksimov.*– M.: Izdatelstvo: «Institut kompyuternykh issledovaniy» (2006).– 488 p. ISBN: 5-93972-547-3.

11. Barenblatt G.I. *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh / G.I. Barenblatt, V.M. Entov, V.M. Ryzhik.*– M.: Nedra, 1984.– 211 p.

12. (2006) Clifford K. Ho, Stephen W. Webb. *Gas Transport in Porous Media / Theory and Applications of Transport in Porous Media.* Book series.– Springer.– 444 p.

13. (2012) M. Kaviany. *Principles of Heat Transfer in Porous Media / Mechanical engineering series.* Springer-Verlag New York Inc., – 646 p. ISBN-10: 1468404148, ISBN-13:978146804142.

14. (2015) Kambiz Vafai. *Handbook of porous media/CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.* – 959 p. ISBN 9781439885543 – CAT#K13996.

15. (2015) Peng Xu, Jianchao Cai, Agus Pulung Sasmito, Sachin Vinayak, & Boming Yu. *Transport Phenomena in Porous Media and Fractal Geometry/ Journal of Chemistry.* Volume 2015, Article ID 486501, 2 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/486501>.

16. (2017) Lihua Zuo and Ruud Weijermars. *Rules for Flight Paths and Time of Flight for Flows in Porous Media with Heterogeneous Permeability and Porosity/ Geofluids.* Volume 2017 (2017), Article ID 5609571, 18 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/5609571>.

17. (2012) Suvorova I.G. *Mathematical and computer modeling of axisymmetric flows of an incompressible viscous fluid by the method of R-functions / I. G. Suvorova, O. V. Kravchenko, I. A. Baranov // Journal of Mathematical Sciences.* Springer US, 2012.– Vol. 184.– No. 2.– pp. 165–180.

18. (2017) Suvorova I.G. *Investigating the hydrodynamics of flows in channels of complex geometric forms // International Conference Differential Equations, Mathematical Physics and Applications, October 17–19, 2017, Cherkasy, Ukraine. Book of Abstracts.*– Vinnytsia: Vasyly' Stus Donetsk National University, 2017.– 84–85 p.

19. (2017) Kravchenko, O., Suvorova, I., Baranov, I., Goman, V. Hydrocavitational activation in the technologies of production and combustion of composite fuels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kravchenko O. /O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, 4 /5 (88), P. 33–42.
20. Rvachev V.L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryie ee prilozheniya./ V.L. Rvachev.– K.: Nauk. Dumka, 1982.– 552 p.
21. Baranov I.A. Novyie R-operatsii razlichnogo klassa gladkosti dlya postroeniya bazisov kraevyih zadach / I.A. Baranov // Vestnik Zaporozhskogo natsionalnogo universiteta, seriya fiziko-matematicheskie nauki.– Zaporozhe: ZNU, 2011.– # 2.– P. 13–28.
22. Lyikov A.V. Teoriya teploprovodnosti / A.V. Lyikov.– M.: Vysshaya shkola, 1967.– 423 p.
23. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena / S.S. Kutateladze.– M.: Atomizdat, 1979.– 416 p.
24. Loytsyanskiy L.G. Mehanika zhidkosti i gaza / L.G. Loytsyanskiy.– M.: Drofa, 2003.– 840 p.
25. Anderson D. Vyichislitel'naya gidromekhanika i teploobmen: V 2-h t. T.1. / D. Andersen, Dzh. Tannehill, R. Pletcher.– M.: Mir, 1990.– 384 p.
26. Chung T.J. Computational Fluid Dynamics / T.J. Chung.– Cambridge: University Press, 2002.– 1012 p.
27. Wesseling P. Principles of Computational Fluid Dynamics /P.Wesseling.– Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.– 644 p.
28. Kutia M. Improvement of technological mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field / M. Kutia, M. Fyk, O. Kravchenko, S. Palis, I. Fyk// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.– 2016.– Vol. 5/8(83).– P. 40–48.

УДК 622.276.6:661.96:532.528

Кравченко О.В., Суворова І.Г., Баранов І.А., Велігоцький Д.О.

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ТЕЧІЮ ТА ТЕПЛООБМІН В СИСТЕМІ "ТРИЩИНА ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ – ФЛЮЇД"

Результати досліджень підтверджують визначальну роль водню як активатора процесів дифузії та фільтрації флюїдів в поровому просторі гірської породи в технології комплексного водневого термобарохімічного впливу на привибійну зону продуктивних горизонтів з метою інтенсифікації видобутку нафти, газу, газового конденсату.

O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, D. Veligotskyi

INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE CURRENT AND HEAT EXCHANGE IN THE SYSTEM "CRACK OF ROCK–FLUID"

The results of the studies confirm the decisive role of hydrogen as an activator of the diffusion and filtration of fluids in the pore space of the rock in the technology of complex hydrogen thermobarochemical effects on the bottomhole zone of productive horizons in order to intensify the extraction of oil, gas, and gas condensate.

УДК 621.951

Хавин Г.Л., д.техн.н., профессор, Хоу Чживень, магистр

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»***ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СВЕРЛАМИ, ОТЛИЧНЫМИ ПО КОНСТРУКЦИИ ОТ СПИРАЛЬНОГО****Ключевые слова:** полимер, композит, сверление, величина расслаивания.

Вступление. Расширение применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных промышленных приложениях потребовало увеличение объемов и качества их механической обработки. Кроме того, появление новых ПКМ требует назначения режимов их обработки, обеспечивающих высокое качество изделий, при использовании традиционных методов сверления, фрезерования, точения и т.д. Наряду с этим происходит конструирование новых типов инструментов и модернизация известных конструкций. Прежде всего, это создание сверл отличных по конфигурации от традиционного спирального сверла и его модификаций. Работы в этом направлении велись давно и были достигнуты определенные успехи, однако, однозначного ответа о преимуществе специальных сверл для ПКМ получить не удастся. Это объясняется наличием таких факторов как сложность изготовления и высокая стоимость, трудности затачивания режущих кромок, требующих зачастую специального оборудования, низкая стойкость при сверлении ряда ПКМ и качество обработанной поверхности не на много превосходящее качество, полученное при использовании спиральных сверл. Однако специальные сверла для ПКМ промышленно выпускаются многими фирмами производителями инструментов, и имеется достаточное количество научных исследований демонстрирующих высокое качество их применения.

Анализ состояния проблемы, последних достижений и публикаций. При сверлении ПКМ главной задачей особенно в аэрокосмической, военной технике и судостроении является обеспечение качества просверленных отверстий. Качество отверстий можно оценить с помощью различных морфологических аспектов, таких как волнистость и шероховатость поверхности стенки, осевая прямолинейность и округлость поперечного сечения отверстия, повреждение отверстия. При сверлении ПКМ качество поверхности, геометрические размеры и допуски трудно реализуются по сравнению со сверлением металлов из-за самой природы ПКМ. Имеют место такие специфические дефекты как трещины, разрывы волокон и растрескивание матрицы, выдергивание волокон, термическое повреждение и расслоение [1]. Главным дефектом является отслаиванием, которое может возникать как на входной, так и на выходной стороне заготовки.

Природа расслаивания заключается в том, что ПКМ не деформируются пластически и за счет осевого контактного усилия (действие осевой силы сверления) происходит разделение слоев на входе (шелушение) и расслоение на выходе сверла. Уровень расслаивания определяется величиной осевого усилия при сверлении, поэтому для уменьшения этого дефекта необходим оптимальный выбор технологических параметров (подача, частота вращения) и создание конструкции сверл, режущая часть и материал которых позволяет перераспределить действующее усилие на большую площадь и уменьшить давление на слои [2].

Классическое представление состоит в том, что низкая скорость подачи и высокая скорость резания улучшают качество обработанного отверстия, как для расслаивания, так и по точности размеров [3]. Однако существует эффект, когда при низкой скорости подачи и высокой частоте вращения шпинделя происходит интенсивный нагрев в зоне резания, и, как следствие, термическая деструкция матрицы и ухудшение качества сверления.

Для улучшения качества обработки применяют различные технические приемы, такие как вибрационное сверление, предварительный нагрев, сверление в подкладную плиту, предварительное пилотное засверливание и особое внимание уделяется разработке инструментов со специальной геометрией. Главная идея специальной геометрии сверл – это уменьшение значения осевой силы или перераспределение ее приложения в зоне резания для снижения эффекта расслаивания на выходе инструмента.

Использование спиральных сверл с подрезающей режущей кромкой (ПРК), рис. 1 [4,5] и сверл с острой тонкой поперечной режущей кромкой дает уменьшение расслаивания и улучшение качества отверстия в целом. Сверло с подрезающей режущей кромкой не имеет режущей части в центре сверла и это дает положительный эффект, прежде всего при позиционировании сверла над центром отверстия (сверла типа «Brad type» и «Brad&Spur»). Периферийные режущие кромки срезают ПКМ обеспечивая высокую чистоту поверхности.

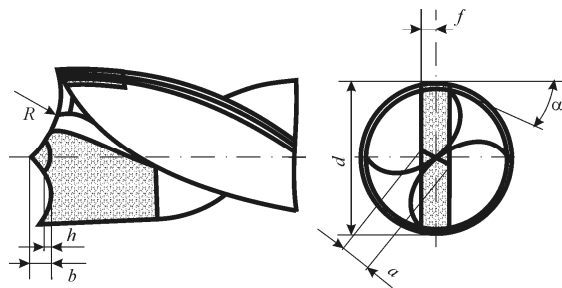


Рисунок 1 – Спиральное сверло с подрезающей режущей кромкой [4]

Преимущество специальных сверл доказано экспериментально, у них осевое усилие распределяется по направлению к периферии сверла, а не сосредоточено в центре, что позволяет увеличить скорость подачи, не вызывая расслаивания [5]. Сверла с подрезающими режущими кромками или пилообразные сверла («saw drill») за счет того что расслоение находится внутри радиуса отверстия, обеспечивает высокое качество сверления. В случае, когда расслоение выходит за диаметр сверла, то осевое усилие намного превосходит осевое усилие для традиционного спирального сверла. Тем же эффектом обладает и «подсвечниковое» сверло («candle stick drill») [3], которое представляет собой сочетание спирального сверла и сверла с подрезающими режущими кромками.

Исследованию эффективности применения сверл с ПРК посвящены работы [6,7]. Авторами в работе [6] рассмотрены способы заточки сверл с подрезающими режущими кромками стандартными шлифовальными кругами, которые одновременно образуют форму двух смежных задних поверхностей, даны методические рекомендации по определению положения сверла и приведены расчёты углов установки при его заточке. Сделан вывод о том, что разработанная методика определения положения сверла с подрезающими режущими кромками при его заточке на универсально-заточном станке с помощью, значительно упрощает расчёты углов установки головки при заточке сверл с

заданными геометрическими параметрами режущей части при различных схемах одно-временной заточки двух смежных плоскостей зуба сверла.

В работе [7] приведены технологические параметры сверл с подрезающими режущими кромками, влияющими на эффективность обработки ПКМ и предложена методика заточки задних поверхностей сверла. Также в работе определены технические критерии затупления инструмента для различных марок обрабатываемых материалов. Авторами приведена методика расчета углов установки сверла на универсально-заточном станке с использованием заточной головки. Сделан вывод, что для сверл с ПРК наибольшее влияние на осевые силы и крутящий момент оказывают величина диаметра, углы заточки по режущей кромке и величина подачи. Проведенные сравнительные испытания сверл с ПРК из быстрорежущих сталей и твердого сплава с учетом производительности и стоимостных затрат на инструмент показали, что лучшими являются сверла из P6M5K5.

Анализ эффективности работы с точки зрения расслаивания на выходе инструмента для 4-ех типов сверл из быстрорежущей стали диаметром 7 мм был сделан в работе [8]. Использовались спиральное сверло с углом при вершине сверла 118° ; спиральное сверло с TiN покрытием и углом 118° ; стандартное сверло «Brad&Spur» длиной 109 мм и ступенчатое сверло длиной 105 мм. Представленные в статье экспериментальные исследования по сверлению стеклопластика для различных значений технологических параметров показали, что подача является основным фактором, влияющим на величину расслаивания для всех 4-ех типов сверл. При этом меньшее значение расслаивания показало ступенчатое сверло, а затем сверло с ПРК.

В работе [9] представлено полнофакторное экспериментальное исследование сверления слоистого углепластика сверлами «Brad&Spur» из твердого сплава диаметром 4, 8 и 12 мм. Было изучено влияние размера сверл и параметров процесса сверления на величину расслаивания углепластика. Для предсказания величины расслаивания использовался метод искусственных нейронных сетей, который показал хорошее совпадение с данными эксперимента. Полученные данные свидетельствуют о том, что величина расслаивания для сверл такого типа возрастает с увеличением диаметра сверла и подачи.

В статье [10] была поставлена цель получить корреляционное соотношение между технологическими параметрами обработки, осевой силой и крутящим моментом и расслаиванием на выходе инструмента. Экспериментальные исследования проводились на углеродистом эпоксидном композитном материале с использованием трех различных сверл: спиральное сверло из быстрорежущей стали HSS-Co, специальное многоцелевое алмазное спиральное сверло Multi Construction из карбида вольфрама с углом при вершине 118° и сверло «Brad&Spur». Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что сверло «Brad&Spur» производит меньше повреждений, чем сверло HSS-Co и сверло Multi Construction, коэффициент расслаивания меньше. Сверло «Brad&Spur» обеспечивает меньшую осевую силу и крутящий момент, чем сверла HSS-Co и Multi Construction. Осевое усилие и расслаивание зависят от скорости резания, скорости подачи и геометрии инструмента. Сверление инструментом HSS-Co во всех случаях вызывает большее расслаивание, что влечет большую дефектность в композитном ламинате. Результаты говорят, что сверло «Brad & Spur» обеспечивает лучшую производительность, чем HSS-Co сверло и многоцелевое спиральное сверло при одинаковых условиях резания (скорости резания и подаче).

Формулировка цели статьи. Основная цель работы – анализ последних достижений, современное состояние проблемы, обзор литературных источников по экспери-

ментальним и теоретическим исследованиям применения сверл с ПРК и аналогичных им при сверлении ПКМ. В качестве главного критерия используется величина расслаивания на выходе инструмента.

Изложение основной части работы. Как показывает опыт сверления стеклопластиков с тканым наполнителем (текстолит, стеклотекстолит) [5] сверло с ПРК позволяет совершенно исключить разломачивание наполнителя на выходе инструмента из отверстия. Это объясняется тем фактом, что в каждый момент времени контакта режущие кромки сверла с ПРК перерезают волокна только одного слоя, не нарушая связи его с остальными. Однако при затуплении сверла с ПРК, расслоение и разломачивание нарастает гораздо интенсивнее, чем для традиционного спирального сверла с углом при вершине 90° . Это, в свою очередь, требует более жестких ограничений по критерию затупления, его уменьшения примерно на 30 %. Следует заметить [5], что стойкость сверл, оснащенных пластинкой из твердого сплава с подрезающими режущими кромками при обработке стеклотекстолитов никогда не превосходит стойкости твердосплавных сверл с уменьшенными до $70\text{--}90^\circ$ углами при вершине. Главное преимущество сверл с ПРК и им подобных это возможность работать с более высокими подачами, чем другие типы сверл, что обеспечивает повышение производительности труда.

В большинстве теоретических работ по предсказанию величины трещины расслаивания [2,11–13], где рассмотрены задачи стабилизации качества поверхности при сверлении заготовки из слоистого ПКМ, для обеспечения качества обработки требуется минимизировать величину длины продольной трещины – l , возникающей на некоторой глубине от нижнего края заготовки, и минимизировать глубину начала отслаивания армирующих слоев – h , рис. 2.

Для практических приложений задается предельное значение глубины отслаивания [h]. При этом возникает вопрос о том, как определить значение величины распространения трещины в продольном направлении и как увязать расчет этой величины с режимными параметрами обработки, геометрией сверла и его стойкостью к изнашиванию.

Согласно теоретическому анализу, приведенному в работе [2], для сверла такой формы режущей части, осевая сила, соответствующая началу старта продольной круговой трещины и появлению отслаивания нижних слоев заготовки, может быть записана в виде

$$F_z = \pi(1 + k_f) \sqrt{\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E \cdot h^3}{3(1 - \nu^2) [1 + k_f^2 (1 - k_l^2)^2]}} \quad (1)$$

где G_{IC} – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м²; E – модуль упругости, Па; ν – коэффициент Пуассона; $k_f = F_{zp} / F_{zc}$ – отношение силы действующей на периферии к центральной силе; $k_l = d / (2 \cdot l)$ – отношение диаметра сверла к общей длине трещины, рис. 2. Практически воспользоваться соотношением (1) для определения длины трещины l не представляется возможным воспользоваться, так как даже если имеется эмпирическое соотношение для осевой силы F_z , то неясно каким образом между собой распределены усилия F_{zp} и F_{zc} , т.е. значение коэффициента k_f .

Использование эмпирических соотношений из работы [4] для различных предельных глубин расслоения показало [3], что с увеличением силы, действующей на пе-

риферии сверла по отношению к центральной осевой силе, величина трещины расслаивания незначительно возрастает в случае, если расслаивание происходит на малой глубине от поверхности выхода сверла. С увеличением глубины начала расслаивания вначале происходит резкий рост длины трещины вплоть до максимального значения примерно при значении $k_f = 1,2$. При дальнейшем увеличении периферийной силы по отношению к осевой, имеет место снижение абсолютной величины трещины расслаивания.

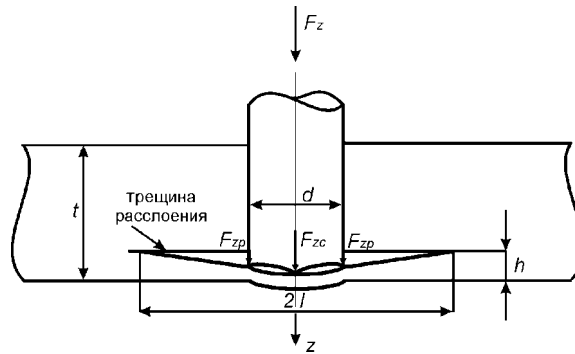


Рисунок 2 – Модель образования межслойной трещины при сверлении слоистого пластика [2]

Использование соотношения из работы [2] Hocheng H. и Tsao C.C. и экспериментального соотношения, полученного регрессионным анализом из работы [4], имеет ряд существенных ограничений:

- использование экспериментального соотношения из работы [4] для сверла типа «saw drill», «candle stick drill», «step drill» дает значительное отклонение при вычислении значения осевой силы;
- полученное в работе [2] соотношение, связывающее интегральную осевую силу с параметрами трещиностойкости, не описывает диапазон изменения отношения периферийной и осевой силы мене 0,5;
- модель не учитывает влияние полученных повреждений и их накопление на общий характер разрушения на выходе сверла из отверстия.

Выводы. Анализ известных теоретических и экспериментальных данных показал, что сверла с подрезающим режущими кромками и аналогичные им по конструкции, дают высокое качество обработки отверстий для тканых стекло- и углепластиков, обеспечивая минимальное расслоение и разлохмачивание на выходе из отверстия. Возможность теоретически предсказать длину и глубину трещины расслоения в настоящее время отсутствует. При выборе режимных параметров обработки необходимо руководствоваться имеющимися эмпирическими рекомендациями и соотношениями изготовителей инструмента. Использование сверл такого типа для обработки отверстий в нетканых композитах уменьшает их преимущество за счет более высокой стоимости изготовления и сложности при заточивании.

Литература

1. Madiwal S. Analysis of surface finish in drilling of composites using neural networks / S. Madiwal // B. E. Karnatak University. – 2006. – P. 1–94.
2. Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – 140. – P. 335–339.

3. Хавин Г.Л. Сверление полимерных композиционных материалов / Г.Л. Хавин. – Харьков: Изд-во «Диса плюс», 2017. – 352 с.
4. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
5. Буловский П.И. Механическая обработка стеклопластиков / П.И. Буловский, Н.А. Петрова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 152 с.
6. Мамлюк О.В. Формообразование режущей части сверл с подрезающими режущими кромками для обработки композиционных материалов / О. В. Мамлюк, Р. П. Родин, О. М. Кошкина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2010. – № 48. – С. 71–79.
7. Лупкин Б.В. Сверление ПКМ сверлами с подрезающими режущими кромками / Б.В. Лупкин, О.М. Кошкина, А.Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2011. – № 49. – С. 68–80.
8. Kiliscap E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method / E. Kiliscap // Indian Journal of Engineering & Materials Science, 2010. – V. 17. – P. 265–274.
9. Krishnamoorthy A. Delamination prediction in drilling of CRFP composites using artificial neural networks / A. Krishnamoorthy, S. Rajendra Boopathy, K. Palanikumar // Journal of Engineering Science and Technology, 2011. – Vol. 6, No. 2. – P. 191–203.
10. Koboevich N. Influence of cutting parameters on thrust force drilling and delamination during drilling of carbon fibre reinforced composites / N. Koboevich, M. Jurjevich, Z. Koboevich // Technical Gazette, 2012. – Vol. 19, No. 2. – P. 391–398.
11. Hocheng H. The path towards delamination-free drilling of composite materials / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – V.167, N2-3. – P. 251–264.
12. Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates / H. Hocheng, C.K.H. Dharan // J. Engineering for Industry. – 1990. – 112. – P. 236–239.
13. Hocheng H. Analysis of delamination in drilling composite materials using core drill / H. Hocheng, C.C. Tsao // Aust. J. Mech. Eng. – 2003.–1, N1.– P. 49–53.

Bibliography (transliteration)

1. Madiwal S. Analysis of surface finish in drilling of composites using neural networks / S. Madiwal // B. E. Karnatak University. – 2006. – P. 1–94.
2. Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – 140. – P. 335–339.
3. Havin G.L. Sverlenie polimernyih kompozitsionnyih materialov / G.L. Havin. – Harkov: Izd-vo «Disa plyus», 2017. – 352 p.
4. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vyisokoprochnyih kompozitsionnyih polimernyih materialov / A.A. Stepanov. – L.: Mashinostroenie, 1987.– 176 p.
5. Bulovskiy P.I. Mehanicheskaya obrabotka stekloplastikov / P.I. Bulovskiy, N.A. Petrova. – L.: Mashinostroenie, 1969. – 152 p.
6. Mamlyuk O.V. Formoobrazovanie rezhushchey chasti sverl s podrezayuschimi rezhushchimi kromkami dlya obrabotki kompozitsionnyih materialov / O. V. Mamlyuk, R. P. Rodin, O. M. Koshkina // Otkryitye informatsionnyie i kompyuternyie integrirovannyye tehnologii, 2010. – # 48. – P. 71–79.

7. Lupkin B.V. Sverlenie PKM sverlami s podrezayuschimi rezhuschimi kromkami / B.V. Lupkin, O.M. Koshkina, A.L. Kass // Otkryitiye informatsionnyie i kompyuternye integrirovannyye tehnologii, 2011. – # 49. – P. 68–80.
8. Kiliscap E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method / E. Kiliscap // Indian Journal of Engineering & Materials Science? 2010. – V. 17. – P. 265–274.
9. Krishnamoorthy A. Delamination prediction in drilling of CRFP composites using artificial neural networks / A. Krishnamoorthy, S. Rajendra Boopathy, K. Palanikumar // Journal of Engineering Science and Technology, 2011. – Vol. 6, No. 2. – P. 191–203.
10. Koboevich N. Influence of cutting parameters on trust force drilling and delamination during drilling of carbon fibre reinforced composites / N. Koboevich, M. Jurjevich, Z. Koboevich // Technical Gazette, 2012. – Vol.19, No. 2. – P. 391–398.
11. Hocheng H. The path towards delamination-free drilling of composite materials / H. Hocheng, C.C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – V.167, N2-3. – P. 251–264.
12. Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates / H. Hocheng, C.K.H. Dharan // J. Engineering for Industry. – 1990. – 112. – P. 236–239.
13. Hocheng H. Analysis of delamination in drilling composite materials using core drill / H. Hocheng, C.C. Tsao // Aust. J. Mech. Eng. – 2003.–1, N1.– P. 49–53.

УДК 621.951

Хавін Г.Л., Хоу Чжівень

ЕФЕКТИВНІСТЬ СВЕРДЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СВЕРДЛАМИ, ВІДМІННИМИ ЗА КОНСТРУКЦІЮ ВІД СПІРАЛЬНОГО

Розглянуто ефективність використання свердлів з підрізаючими ріжучими крайками та аналогічними їм за конструкцією для свердлення полімерних композиційних матеріалів. Показано, що свердла цього типу дають високу якість обробки на виході з отворів для тканих скло- та вуглепластиків. Враховуючи, що теоретичне прогнозування величини тріщини розшарування відсутня, при виборі режимних параметрів обробки необхідно керуватися існуючими емпіричними рекомендаціями та співвідношенням виробників інструменту.

G. Khavin, Khou Zhi Vien

EFFICIENCY OF DRILLING POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS BY DRILLS, WHICH AS A TOOL ARE DIFFER FROM THE TWIST DRILL

Efficiency of use of drills with undercutting cutting edges and similar ones under construction for drilling of polymer composite materials is considered. It has been shown that the drills of this type provide high processing quality at the exit from the holes for woven glass-reinforced and carbon-reinforced plastics. Given that there is no theoretical prediction size of the delamination crack, the choice of regime processing parameters should be guided by existing empirical recommendations and the ratios of tool manufacturers.

УДК 371.53

Тихомирова Т.С., к. техн. наук, доцент, Філенко О.М., к. техн. наук, доцент,
Шестопапов О.В., к. техн. наук, доцент, Горбунова О.В., асистент¹,
Дуюн О.А., психолог вищої категорії²

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

²Комунальний закладу "Спеціальний навчально-виховний комплекс I-II ступенів № 2"

ДОСВІД ПОЄДНАННЯ STEM ТА ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ В ЛІТНЬОМУ ТАБОРІ НА БАЗІ ТЕХНІЧНОГО ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

Ключові слова: STEM-освіта, інклюзивна освіта, літній табір, апсайклінг, власний проект.

Запровадження STEM-освіти є відповіддю системи освіти на падіння популярності технічних дисциплін та зниження рівня зацікавленості учнів та вчителів до вивчення циклу математично-фізичних шкільних курсів. Майже усі розвинені країни стикнулися з подібними проблемами, Україна також не стала винятком. Завдяки сучасним інформаційним інструментам освітяни України пішли шляхом адаптації вже існуючих закордонних підходів та програм в галузі STEM-освіти, вносячи при цьому власні елементи та розробки [1]. Відмічаємо, що з 2015 року МОН України розробляє методичні та методологічні засади успішного впровадження STEM-освіти на різних рівнях підготовки школярів та студентів [2].

Відмічаємо, що наразі нема єдиного загальноприйнятого визначення та трактування поняття STEM-освіти, оскільки кожна країна та групи науковців підходять до визначення поняття з різних позицій. Найбільш поширеним є наступне визначення STEM-освіти (S – science, T – technology, E – engineering, M – mathematics) – природничі науки, технології, інженерія, математика – система освіти, стимулююча оволодіння знаннями і навичками технологічних наукових напрямів. Але таке визначення не дає уяви про власне сутність підходу. Автори для себе в цій статті зосередилися на першому основному етапі STEM-освіти – це пробудження зацікавленості школярів до вивчення технічних дисциплін та на останньому етапі – втілення власного проекту у життя.

Інклюзивна освіта для дітей з особливими потребами є пріоритетним напрямком соціалізації таких школярів. 1 жовтня 2010 року наказом Міністра освіти і науки України затверджено Концепцію розвитку інклюзивної освіти, якою передбачено визначення пріоритетів державної політики у сфері освіти в частині забезпечення конституційних прав і державних гарантій дітям з особливими освітніми потребами; створення умов для вдосконалення системи освіти та соціальної реабілітації дітей з особливими освітніми потребами, у тому числі з інвалідністю, шляхом упровадження інноваційних технологій, зокрема, інклюзивного навчання; формування нової філософії суспільства щодо позитивного ставлення до дітей та осіб із порушенням психофізичного розвитку й інвалідністю [3]. Але ця концепція не стосується інклюзивної освіти дітей за межами середньої школи, особливо у ланцюгу взаємодії між школами та вищими начальними закладами. Звичайні діти, на відміну від дітей з особливими потребами досить часто відвідують різноманітні тематичні заходи для школярів на базі вишів, беруть участь у певних проектах. Такий певною мірою дискримінаційний підхід пов'язано, перш за все,

на думку авторів, з нетривалим запровадженням обох типів освіти – інклюзивної та STEM та відсутністю єдиного методологічного підходу до такого поєднання.

Усі діти з особливими потребами з точки зору можливості їх залучення саме до проектів в рамках STEM-освіти за своїм фізичним та розумовим станом умовно можуть бути поділені на наступні групи:

1) діти з вадами зору. На сьогодні відсутній механізм їх залучення до STEM-освіти, оскільки візуалізація фундаментальних принципів та законів є основним шляхом мотивування та зростання інтересу для школярів до вивчення технічних дисциплін;

2) діти з вадами слуху. Якщо такі діти вміють читати по губах, то їх інтеграція у STEM-простір не відрізняється від звичайних дітей. Якщо діти можуть працювати тільки з сурдоперекладачем, то за умов наявності такого фахівця за місцем основного навчання у спеціалізованому інтернаті ці діти також без особливих проблем долучаються до STEM-освіти;

3) діти, які мають тяжкі порушення розумового розвитку, в тому числі діти-аутисти та діти, не соціалізовані у суспільстві. Найчастіше такі діти з-за свого стану взагалі не залучені до освіти та не можуть бути залучені до STEM-освіти;

4) діти, які мають тяжкі фізичні вади, особливо проблеми з рухливим апаратом, але при цьому їх інтелектуальний розвиток відповідає рівню звичайних однолітків та навіть перевищує його. Ця група дітей може бути залучена до STEM-освіти за умови створення умов для їх пересування у виші чи за умови налагодження каналу спілкування через мережу Internet в реальному часі.

5) діти, які навчаються у спеціалізованих інтернатах та мають відхилення психологічного, психоемоційного розвитку середньої важкості, ці діти соціалізовані, навчаються за спеціальними програмами, в тому числі діти з аутичними розладами середньої важкості. Такі діти потенційно можуть стати основними учасниками програми STEM-освіти за певних умов.

Саме діти з четвертої групи стали учасниками літнього табору StemCampSchool який проходив в червні 2018 року на базі НТУ «ХПІ» (м. Харків). У таборі велася робота з наступних напрямків: енергетика та електроніка, екологія, фізика, хімія, інженерне проектування і математичне моделювання. У перших п'яти напрямках брали участь особливі діти, які є вихованцями Комунального закладу "Спеціальний навчально-виховний комплекс I-II ступенів № 2" (далі – СНВК №2) Харківської обласної ради (м. Харків, пров. Карпівський, 21/23). Діти, які навчаються в цьому закладі мають не тяжкі порушення психоемоційного розвитку, з ними проводиться корекційне виховання, вони соціалізовані, зовні нічим не відрізняються від звичайних дітей. В інтернаті навчаються в тому числі діти з Харківської області з затримкою психічного розвитку, розладами аутичного спектру, розумова відсталість. Найбільша кількість особливих дітей – 15 осіб віком від 14 років – брали участь у роботі напрямку «екологія». Під час навчання в інтернаті ці діти не вивчають предмети типу «біологія», «хімія», «географія» за традиційною шкільною програмою, але вони мають достатню уяву про навколишній світ, природні явища та процеси для того, щоб зацікавитися дослідженнями та їх розумінням.

Найбільшою проблемою для дітей з СНВК №2 є навіть не відставання у розвитку, а соціальна ізоляція. Ці діти спілкуються тільки зі своїми однокласниками, вчителями та батьками. Але більшість з них має сучасні смартфони та акаунти (облікові записи) в соціальних мережах та прагнуть спілкуватися зі звичайними дітьми на різноманітні теми. Їх цікавлять та ж сама сучасна музика, фільми та спортивні події.

Поєднання особливих та звичайних дітей в рамках StemCampSchool відбулося через сумісну працю впродовж 10 днів над власними проектами. Тільки викладачі вищу, які стали менторами (наставниками) у кожному напрямі знали, що в їх групах є особливі діти. Серед факторів, які сприяли успішному включенню дітей з особливими потребами до STEM-освіти найбільш вагомим автори вважають саме відсутність попереднього інформування звичайних дітей про наявність в їх групі особливих дітей (таблиця 1), адже спілкування між дітьми почалося без будь-яких соціальних чи освітніх ярликів.

Основна увага в рамках літнього табору була повернута до практичного опанування отриманих знань та набуття навичок їх застосування. В напрямі «екологія» проекти, над якими працювали групи школярів з 5 осіб, були присвячені вирішенню локальних екологічних проблем, складанню інтерактивних екологічних мап та апсайклінгу (табл. 2)

Таблиця 1 – Фактори та їх вагомість, які впливають на успішне поєднання особливих та звичайних дітей в рамках STEM-освіти

Назва фактору	Стислий опис фактору	Вага, %
Інкогніто	Під час першого знайомства групи школярів тільки називали свої імена та улюблених героїв, без виказання номеру школи та навіть віку. Такий підхід дозволили зберегти певну таємницю особливих дітей на декілька днів, адже зовні вони не відрізнялися від звичайних.	30
Тренінги для менторів та волонтерів	Перед початком проекту психолог з СНВК №2 провела низку тренінгів, мета яких була пояснити та навчити основам спілкування та взаємодії саме з цими особливими дітьми для викладачів та студентів-волонтерів. Така підготовка дозволила напрацювати готові рішення для запобігання чи вирішення конфліктних ситуацій, підготувати викладачів до можливих відхилень у поведінці особливих дітей та навчити їх швидко реагувати й коректувати такі прояви	20
Адаптація освітніх матеріалів	За програмою табору перед безпосереднім виконанням проектів школярі отримували інтенсивну теоретично-практичну підготовку. Весь умовно «лекційний» матеріал було представлено у вигляді сучасних презентацій з використанням ілюстрацій та відео-файлів. Ментори відмовилися від монологу у викладанні матеріалів. В аудиторії було налагоджено дискусію, під час якої ментори задавали особливим дітям тільки ті питання, на які вони могли дати відповідь з огляду на їх рівень знань та розуміння. Таким чином особливі діти не відчували себе неповноцінними у групі, адже демонстрували обізнаність та ерудованість.	30
Волонтерська підтримка	Основна роль волонтерів, які супроводжували кожную групу, була помічати будь-які прояви агресії з боку звичайних дітей та початок не стандартної поведінки особливих дітей та швидка реакція на такі події з одночасним поверненням уваги ментора.	20

Таблиця 2 – Екологічні проекти, реалізовані школярами у напрямі «екологія» під час StemCampSchool

Назва проекту	Суть проекту	Що виконували особливі діти	Досягнення особливих дітей
Екологічна безпека питної води	Виміряти загальний вміст солей та їх хімічний склад у питній воді з різних місць відбору у м. Харків та області; створити мапу з нанесеними небезпечними точками відбору	Відбирали зразки питної води для дослідів у місцях де вони мешкають; знімали показання приладу з приладу для вимірювання загальної мінералізації води	Вперше здійснювали спільні дослідження разом з звичайними дітьми; вперше тримали у руках справжні наукові прилади та самостійно виконували певні вимірювання; отримали базові знання про склад питної води
Мапа електромагнітних полів ХПІ	Нанести на мапу НТУ «ХПІ» місця, де виявлено перевищення напруженості електромагнітних полів	Знімали показання приладу з приладу	Дізналися про наявність невидимих для ока полів та зрозуміли, чому неможна притулятися до моніторів та мікрохвильових печей
Вміст нітратів у харчових продуктах	Визначити за допомогою екотестеру вміст нітратів у сезонних та екзотичних фруктах та овочах, придбаних у різних торговельних місцях	Збирали овочі та фрукти для дослідів на власних садових ділянках; вимірювали вміст нітратів	Дізналися про наявність в овочах та фруктах небезпечних сполук типу нітрати, навчилися визначати їх вміст
Апсайклінг	1) створення вуличного арт-об'єкту з вживаного взуття; 2) виготовлення м'яких іграшок з непотрібних частин одягу та наповнення їх вживаними поліетиленовими пакетами; 3) виготовлення різноманітних підставок з використанням непотребу	Розробляли ескізи майбутнього арт-об'єкту, розмальовували взуття; самостійно шили іграшки; робили інші корисні речі з непотребу	Дізналися та навчилися робити різноманітні вироби не з готових розвиваючих наборів, а з використанням речей, які здаються непотрібними

На думку авторів статті, найбільш вдалим з точки зору подальшого розвитку та використання у повсякденному житті є залучення особливих дітей до проектів з апсайклінгу (перетворення потенційного сміття на корисні сучасні речі чи об'єкти). Треба відзначити, що загалом особливі діти з СНВК №2 вміють багато чого робити власними руками, в них гарно розвинута дрібна моторика. Але переважно вони роблять свої саморобки не з вторинних чи вживаних матеріалів. Привернення уваги особливих дітей до проблеми утилізації побутових відходів шляхом їх перетворення на корисні чи красиві речі стала поштовхом до усвідомлення взагалі проблеми побутових відходів для цих дітей. Вже зараз особливі діти після участі StemCampSchool збирають гудзики та кришки з-під ПЕТ-пляшок для своїх майбутніх саморобок, а також малюють ескіз свого арт-об'єкту з вживаного взуття й вже принесли до інтернату 100 пар вживаного взуття, яке таким чином не потрапить на полігони. При цьому, особливі діти підтримують зв'язок з іншими учасниками табору, обговорюють свої нові екологічні проекти – для цієї групи дітей соціальний бар'єр зламано. Звичайно, апсайклінг у виконанні особливих дітей не спроможній вирішити проблему зменшення кількості побутових відходів в масштабах країни. Водночас, такі проекти здатні привернути увагу громадськості та стати корисними при формуванні екологічної свідомості українців.

Особливістю інклюзивної освіти є її обмеженість середньою школою й професійними училищами для більшості особливих дітей [4]. Тільки не значна кількість особливих дітей продовжує навчання у вищих навчальних закладах, більшість отримує робітничі професії. Подолати певну дискримінацію у доступі до вищої освіти не можливо з-за медичного стану здоров'я особливих дітей. Участь особливих дітей у різноманітних літніх таборах на базі вищів разом зі звичайними дітьми може стати тим поштовхом, який не тільки допоможе подолати соціальну ізоляцію, але й допоможе почуватися особливим дітям рівними, мати уяву та знання про елементарні наукові дослідження та підвищити їх обізнаність. Такі програми на разі потребують додаткових методичних досліджень та обґрунтування, подальшої адаптації та удосконалення. Не дивлячись на відсутність попереднього досвіду, автори статті вважають успішно реалізованим проект з поєднання інклюзивної та STEM-освіти.

Література

1. STEM School [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.stemschool.com/>. – Title on the screen.
2. Шарко В.Д. Модернізація системи навчання учнів STEM-дисциплін як методична проблема // Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. – Випуск 10 (III). – с. 160–165.
3. Левченко Л.С. Розвиток системи інклюзивної освіти в Україні // Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології. – 2015. – № 3 (47). – с. 27–36.
4. Колупаєва А.А., Софій Н.З., Найда Ю.М. Концептуальні аспекти інклюзивної освіти / Н.З. Софій, Ю.М. Найда / Інклюзивна школа: особливості організації та управління: навчально-методичний посібник / А.А. Колупаєва, Н.З. Софій, Ю.М. Найда [та ін.]; за заг. ред. Л.І. Даниленко. – К., 2007. – С. 128.

Bibliography (transliterated)

1. STEM School [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.stemschool.com/>. – Title on the screen.

2. V.D. Sharko Modernizatsiia systemy navchannia uchniv STEM-dystsyplin yak metodychna problema //Naukovi zapysky. Seriia: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity. – Vypusk 10 (III). – p. 160-165.

3. L.S. Levchenko Rozvytok systemy inkliuzyvnoi osvity v Ukrainy // Pedagogichni nauky: teoriia, istoriia, innovatsiini tekhnolohii. – 2015. – № 3 (47). – p. 27–36.

4. Kolupaieva A.A., Sofii N.Z., Naida Yu.M. Kontseptualni aspekty inkliuzyvnoi osvity / N.Z. Sofii, Yu.M. Naida / Inkliuzyvna shkola: osoblyvosti orhanizatsii ta upravlinnia: navchalno-metodychnyi posibnyk / A.A. Kolupaieva, N.Z. Sofii, Yu.M. Naida [ta in.]; za zah. red. L.I. Danylenko. – K., 2007. – P. 128.

УДК 371.53

Тихомирова Т.С., к. техн. наук, доцент, Филенко О.Н., к. техн. наук, доцент,
Шестопапов А.В., к. техн. наук, доцент, Горбунова О.В., ассистент,
Дуюн О.А., психолог высшей категории,

ОПЫТ ОБЪЕДИНЕНИЯ STEM И ИНКЛЮЗИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ЛЕТНЕМ ЛАГЕРЕ НА БАЗЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В статье проанализирован первый опыт объединения инклюзивного и STEM образования для школьников в рамках летнего лагеря, приведены факторы, способствующие успешному соединению и намечены направления дальнейшего совершенствования такой формы сотрудничества. Выявлено проблемы, с которыми могут столкнуться преподаватели вузов, работающие в направлении сочетания инклюзивного и STEM образования.

Tykhomyrova T.S., Shestopalov O.V., Filenko O.N., Gorbunova O.V., Duiun O.A.

EXPERIENCE OF COMBINING STEM AND INCLUSIVE EDUCATION DURING SUMMER CAMP AT TECHNICAL UNIVERSITY

First experience of inclusive and STEM education combination for pupils within the framework of the summer camp are analyzed, factors contributing to the successful combination and outlines directions for further improvement of this form of cooperation are presented. The problems faced by high school lecturers who work towards a combination of inclusive and STEM education are identified.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

3'2018

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 20.09.2018 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–50.
Зам. № 126. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.