

# РОЗРОБКА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ РОДОВИЩ

УДК 622.245.44

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБУХОВОГО ПАКЕРА

С.В. Цибулько

ДП "ЛІКВО" НАК "Нафтогаз України", 61109, м. Харків, вул. Сінна, 32  
тел. (057) 7019030, 7019013, газ.(68) 20-13, e-mail: likvo@ukr.net

*Розглянута у статті проблем актуальна для випадків розмежування близько розташованих пластів у нафтових і газових свердловинах при зміні експлуатаційного горизонту. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що вирішення цієї проблеми полягає у відмові від традиційного методу розмежування пластів шляхом встановлення цементного моста і переході на використання пакерів. Найбільш прийнятними з позиції значної економії зусиль і часу є вибухові пакери, які, однак, потребують оптимізації, що полягає у виключенні температурного впливу на свердловинне середовище з підвищенням їх стійкості до електрохімічної корозії. Запропонована стаття висвітлює дослідження і висновки автора з питання оптимізації вибухового пакера, що полягає у перенесенні вибуху порохового заряду із оболонки пакера в видалену камеру згорання.*

Ключові слова: свердловина, пакер, оболонка, вибух, оптимізація

*Рассматриваемая в статье проблема актуальна для разделения близлежащих пластов в нефтяных и газовых скважинах при изменении эксплуатационного горизонта. Анализ современных исследований показал, что решение этой проблемы заключается в отказе от традиционного метода разделения пластов путем установления цементного моста и перехода к использованию пакеров. Наиболее приемлемыми с позиции значительной экономии сил и времени являются взрывчатые пакера, которые, однако, требуют оптимизации, состоящей в исключении температурного воздействия на скважинную среду и повышении их устойчивости к электрохимической коррозии. В предлагаемой статье представлены исследования и выводы автора по вопросу оптимизации взрывчатого пакера, заключающейся в переносе взрыва порохового заряда из оболочки пакера в удаленную камеру сгорания.*

Ключевые слова: скважина, пакер, оболочка, взрыв, оптимизация

*The problem considered in the article is urgent for cases of delimitation of closely spaced layers within oil and gas wells in changing the operating horizon. The analysis of modern studies concerning this problem testifies that solving this problem lies in the refusal from the conventional technique of layers delimitation by setting a cement bridge and transition to the use of packers. The most acceptable from the point of view of saving considerable amount of time and efforts are explosive packers, but for their implementation it is necessary it is necessary to optimize them that is connected with eliminating temperature effect on the borehole environment and increasing their resistance to electrical and chemical corrosion. The proposed article highlights the research and author's findings on the problem of optimizing explosive packer, which means transferring explosion powder charge from the packer's shell into the removed combusting chamber.*

Keywords: well, packer, a cover, explosion, optimization

Останнім часом у процесі освоєння нових родовищ ГПУ "Полтавагазвидобування" і ГПУ "Шебелинкагазвидобування" часто стикаються з випадками близького по вертикалі залягання продуктивних газоносних горизонтів. У таблиці 1 наведено їх вибірку з нововведених в експлуатацію свердловин, що підтверджує типовість випадків близького залягання горизонтів. Аналіз таких типових випадків свідчить, що при розмежуванні таких пластів доводиться мати справу з відстанями між сусідніми горизонтами близько 20-30 метрів.

Традиційний метод розмежування пластів шляхом встановлення цементного мосту в експлуатаційній колоні вимагає наявності значних розмежувальних відстаней між горизонтами по вертикалі. Зазвичай висота цементного мосту за нормальних перепадів тиску між пластами становить 50 метрів, а за підвищених перепадів тиску – ще більша [1]. Висота цементного мосту обумовлена протяжними перехідними зонами змішання цементного розчину із залишками попереднього розчину в свердловині. Не останню роль відіграє й фізичний склад попереднього розчину, особливо насиченого обважнюва-

Таблиця 1 – Типові випадки свердловин з близьким заляганням горизонтів

Свердловина	Індекс продуктивного горизонту	Інтервал залягання горизонту, м	Пластовий тиск, МПа	Висота пропластка, м
Боровська №10	У-25-26	4025-4035	42,40	25
	У-18-19-20	3910-4000	41,10	
Комишнянська №24	У-22н	5840-5900	85,88	20
	У-22в	5780-5820	85,00	
Комишнянська №24	У-22в	5780-5820	85,00	20
	У-21н	5680-5760	76,27	
Наріжнянська №36	С-7	3690-3760	38,33	20
	С-5	3630-3670	37,75	
Підлісківська №2	У-17	3680-3700	39,69	30
	У-16	3620-3640	39,04	
Святогірська №16	М-4	4610-4650	70,10	30
	М-3	4550-4580	69,12	
Яблунівська №403	У-17	4045-4080	43,92	25
	У-16	4000-4020	43,14	
Східно-Полтавська №66	М-2	4720-4765	50,88	30
	М-1	4660-4690	49,22	

Таблиця 2 – Технічна характеристика модифікацій пакера ВП

Модифікація пакера	ВП 88	ВП92	ВП102	ВП110	ВП118	ВП135
Зовнішній діаметр, мм	88	92	102	110	118	135
Довжина пакерного елемента, мм	475	490	535	570	605	605
Вага пакерного елемента, кг	5,15	6,30	7,90	9,64	11,62	15,68

чами, які створюють щільну потужну кірку на стінці експлуатаційної колони. У такому випадку одержуємо міст із міцним цементним ядром і неміцною глинистою кіркою вздовж границі зчеплення з тілом колони. Така глиниста кірка, розмочена водою, що просочилася в свердловину, призводить до утворення уздовж внутрішньої стінки колони шляхів перетікання газу: спочатку мікроскопічних, але з динамікою подальшого їх розмивання до неприпустимих розмірів.

У випадку обмеженої по довжині зони експлуатаційної колони, вільної для встановлення цементного мосту, як розмежувальний міст використовують пакер. З метою усунення несприятливого корозійного впливу свердловинного середовища та підвищення надійності на встановлений пакер виливають порцію цементного розчину, що створює цементний купол висотою до 3-5 метрів. Пакер також застосовують для створення штучного вибою в свердловині з метою встановлення відхилювача у процесі забурювання другого її стовбура [2].

Особливо слід виділити оболонкові пакери й пакери-гільзи із пластичних матеріалів, які складаються із частин, що повертають із свердловини, і оболонкового пластичного пакерного елемента. Частини, що повертають, використовуються багаторазово. Пакерний елемент є одноразовим видатковим вузлом, який після приведення до робочого стану незворотно деформу-

ється. За потреби його усувають зі свердловини розбурюванням.

За способом приведення до робочого стану пакери, у свою чергу, поділяються на гідроприводні та вибухові.

Гідроприводний пакер опускають у свердловину на колоні насосно-компресорних труб і приводять до робочого стану тиском робочої рідини від насоса на поверхні свердловини. Частини, що повертають, від'єднують від пакера обертанням колони й вилучають зі свердловини у процесі підймання колони. Встановлення такого пакера в міст пов'язано із тривалими операціями опускання-підймання колони насосно-компресорних труб.

Вибуховий пакер опускають у свердловину каротажним підйомником на вантажному геофізичному кабелі, приводять в робочий стан й від'єднують від частин, що повертають, енергією вибуху порохового заряду. Частини, що повертають, витягають на устя разом із кабелем. Перевагою використання вибухового пакера у порівнянні з іншими методами за рівних умов є істотно менші затрати зусиль і часу.

Оптимізації вибухового оболонкового пакера із пластичного матеріалу й присвячена запропонована стаття.

Як приклад вибухового оболонкового пакера із пластичного матеріалу розглянемо пакер типу ВП, призначений для роботи за гідростатичного тиску до 60МПа й температури до

120°C. Технічна характеристика модифікацій пакера ВП наведена у табл. 2.

На рис. 1, а зображено конструкцію пакера ВП, готового до застосування, а на рис. 1, б – пакер ВП після деформації вибухом і від'єднання частин, що повертають. Пакер складається із частин 1, що повертають, із вантажем-обважнювачем і кабельною підвіскою, пластичного алюмінієвого корпусу 2, поршневого замка 3 і електрозапальника 4. Корпус має вигляд пустотілого стакана із кришкою, усередині якого розміщено заряд металевий вибухової речовини (найчастіше піроксилінового порошу). Поршневий замок оснащений кульками 5, які під час переміщення поршня замка під дією тиску вибуху в крайнє верхнє положення скочуються із зовнішньої обойми до центру замка і вивільняють із зачеплення частини, що повертають. Кабель електрозапальника оснащений штекером 6 для роз'єднання.

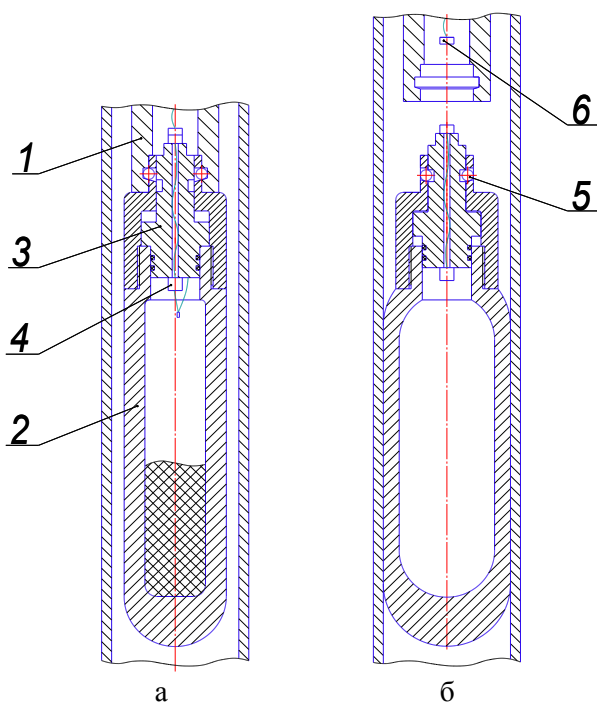


Рисунок 1 – Пакер ВП у готовому до застосування стані (а) та після деформації вибухом і від'єднання частин, що повертають (б)

Пакер спрацьовує під тиском порохових газів від згоряння розміщеного усередині корпусу порохового заряду. Запалювання заряду ініціює розігрівання нитки розжарювання електрозапальника за сигналом з поверхні свердловини, який передають від електричного комутатора сигналу вантажним геофізичним кабелем.

Розглянемо основні недоліки пакера ВП.

Недолік перший пов'язаний із температурними і динамічними навантаженнями на стінку колони й на за колонний цементний камінь. Для аналізу ситуації й для розрахунків приймемо таке припущення: фізичні характеристики матеріалів вибираємо за фізичними характеристиками їх основного елемента: для продуктів згоряння порошу - за  $\text{CO}_2$ , для алюмінієвого сплаву

пакера - за Al, для сталі стінки колони - за Fe, для цементного каменю - за CaO, для навколишньої породи - за  $\text{SiO}_2$ .

Під дією тиску продуктів згоряння порохового заряду відбувається пластична деформація оболонки пакера, після чого залишковий тиск сприймають стінка колони, за колонний цементний камінь і навколишня порода. При цьому відбувається їхня пружна деформація. За однакових температур лінійне розширення стінки колони й за колонного каменю практично однакове й порушення суцільності цементу не відбувається, оскільки навантаження від тиску, що сприймається колоною, викликає їх однакову пружну деформацію.

Однак, температурне розширення впливає суттєво. При згорянні порохового заряду масою  $m$  (кг) і теплою вибуху  $Q_v$  (МДж/кг) виділяється кількість теплоти  $G$  (Дж)

$$G = Q_v m.$$

Виділене тепло по чергово передається через верстви радіусом  $R$  (мм) стінки пакера, стінки колони й за колонного цементного каменю в навколишню породу, викликаючи їхнє нагрівання. Через різницю коефіцієнтів теплопровідності матеріалів різних верств їхня температура буде різною [3].

Як видно з розрахункового дослідження, результат якого наведені на графіку рис. 2, температура стінки колони  $T_{\text{срFe}}$  у початковий період остигання продуктів згоряння порошу після вибуху буде істотно вищою за температуру цементного каменю  $T_{\text{срCaO}}$ .

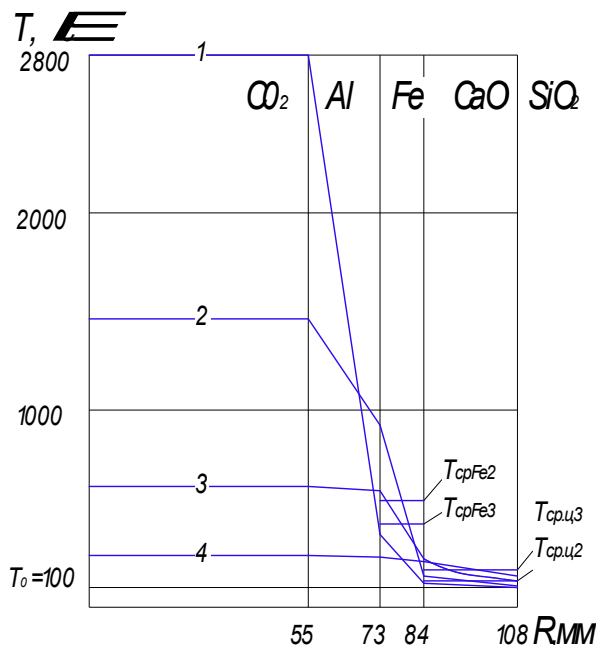


Рисунок 2 – Розрахункове дослідження температури  $T$  верств (порожина пакера - стінка пакера - стінка колони - цементний камінь - порода) у різні періоди  $\tau$  часу повного остигання порохових газів (1 - відразу після вибуху, 2 - через 0,25  $\tau$ , 3 - через 0,5  $\tau$ , 4 - через 0,75  $\tau$ ), де  $R$  - зовнішній радіус верстви

У результаті, через різницю середніх температур верств виникнуть різні температурні розширення:  $\delta_{CaO}$  – цементного каменю радіусом  $R_{CaO}$  і  $\delta_{Fe}$  – стінки колони радіусом  $R_{Fe}$ ,

$$\begin{aligned} \delta_{CaO} &= (T_{cp\ CaO} - T_0) K_{\dot{\alpha}\ CaO} 2 R_{CaO}, \\ \delta_{Fe} &= (T_{cp\ Fe} - T_0) K_{\dot{\alpha}\ Fe} 2 R_{Fe}, \\ (T_{cp\ CaO} - T_0) &< (T_{cp\ Fe} - T_0), \end{aligned}$$

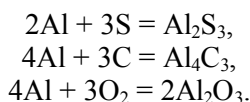
де:  $K_{\dot{\alpha}\ CaO} = 6,5 \times 10^{-6}$  ( $1/^\circ\text{C}$ ) – коефіцієнт температурного розширення цементного каменю,  $K_{\dot{\alpha}\ Fe} = 8,5 \times 10^{-6}$  ( $1/^\circ\text{C}$ ) – коефіцієнт температурного розширення стінки колони. Це призведе до порушення суцільності заколонного цементного каменю і його розтріскування навпроти місця установлення пакера. Ступінь руйнування цементного каменю залежить від твердості і пластичності навколишньої породи. Виниклі тріщини у цементному камені можуть стати каналами перетікання флюїду між пластами в обхід свердловини заколонним простором.

Очевидно, що якщо виключити або зменшити перегрівання стінки експлуатаційної колони від теплоти вибуху порохового заряду, то можна істотно підвищити надійність розмежування пластів свердловини.

Недолік другий пов'язаний з явищем електрохімічної корозії поверхні пакера. Корпус пакера ВП для досягнення максимальної пластичності виконують із алюмінієво-марганцевого сплаву, більшу масову частку якого складає алюміній. Електродний потенціал алюмінію становить  $U_{Al} = -1,66\text{В}$ . Стінка експлуатаційної колони виконана зі сталі, де більшу масову частку складає залізо. Електродний потенціал заліза становить  $U_{Fe} = -0,44\text{В}$ . При контакті із солоною водою, пари якої присутні в ізольованій підпакерній порожнині експлуатаційної колони й конденсуються на нижній частині корпусу пакера, виникає ефект гальванічного елемента, де солоня вода виконує роль електроліту. При цьому залізо відіграє роль катода, а алюміній – анода. Виниклий потік електронів спрямовується від стінки пакера до стінки колони під дією електричного потенціалу  $U_{Fe}$ ,

$$U_{Fe} = U_{Al} - U_{Fe}.$$

У такій гальванічній парі Al – Fe алюмінієвий корпус пакера слугуватиме протекторним захистом для стінки колони й поступово розчинятиметься, втрачаючи свою зовнішню геометрію [4]. Електрохімічне розмивання корпусу пакера супроводжуватиметься реакцією окислювання поверхні пакера вільними сіркою, вуглецем і киснем:



Очевидно, що якщо створити діелектричний нейтральний захист днища й стінок пакера й тим самим виключити дію на них електрохімічної корозії, то можна істотно збільшити час надійної роботи пакера.

Недолік третій пов'язаний з порушенням геометрії внутрішньої стінки експлуатаційної колони в місці встановлення пакера. У процесі

опускання в свердловину і підймання технологічного устаткування внутрішня стінка колони ушкоджується внаслідок тертя металу з металом. При цьому сліди зношування розвиваються вздовж стінки, якщо опускання й підймання устаткування здійснюється без обертання, і по гвинтовій лінії, якщо опускання й підймання супроводжуються обертанням. Сліди зношування особливо помітні в місцях викривлення осі свердловини. Умовно сліди зношування можна поділити на потертості й борозни. Потертості характеризуються значним співвідношенням ширини ушкодження  $b_n$  до його глибини  $z_n$ . При цьому розмір  $b_n$  є величиною одного порядку із радіусом колони  $R_k$ :

$$b_n / z_n > 5, \quad b_n / R_k \rightarrow 1.$$

Борозни характеризуються близькими розмірами ширини  $b_b$  і глибини  $z_b$ , при цьому розмір  $b_b$  значно поступається радіусу колони  $R_k$ :

$$b_b / z_b \rightarrow 1, \quad b_b / R_k \rightarrow 0.$$

Аналіз взаємодії оболонки пакера з ушкодженою стінкою колони свідчить, що пластична деформація стінки пакера дає змогу щільно перекрити потертості. Однак у разі перекриття борозни стінка пакера утворює "міст" над борозною, під яким зберігається канал для міжпластового перетікання флюїду. Очевидно, що створення на зовнішній стінці пакера тонкого шару пружного матеріалу, що легко деформується, істотно підвищить надійність перекриття місць ушкодження внутрішньої стінки колони.

Другий і третій недоліки схожі тим, що рішення щодо їх усунення впливає із самої постановки задачі. Для створення на зовнішній стінці пакера тонкого шару пружного матеріалу, що легко деформується і має діелектричні властивості, досить укласти корпус пакера в гумовий чохол. Однак при цьому слід врахувати вплив на гуму температурного фактора [5].

Підвищення температури гірських порід із глибиною характеризується геотермічним градієнтом  $\Gamma$ . У середньому для порід осадової товщі сходу України, величина геотермічного градієнта дорівнює  $0,029\ ^\circ\text{C}/\text{м}$ , а характерна пластова температура  $T_{пл}$  на глибині 2000м дорівнює  $58\ ^\circ\text{C}$ . Пластова температура  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) у свердловині на глибині  $H$  (м) обчислюється за формулою

$$T = T_{пл} + \Gamma(H - 2000).$$

Розрахунок температур для свердловин згідно даних, зведених до табл. 1, свідчить, що на глибинах встановлення розмежувального пакера температура навколишнього середовища повинна становити  $105-170\ ^\circ\text{C}$ . Спеціально для роботи за таких температур у нафтогазовій галузі використовують маслобензо- і термостійкі гуми із сумішей ІРП (табл. 3) [6]. Така гума може піддаватися короткочасному (не більше 5-10 хвилин) перегріванню на  $30-40\ ^\circ\text{C}$ , що не призведе до втрати її пружних характеристик. Однак, як показано вище на рис. 2, у момент після вибуху порохового заряду температура оболонки пакера може підвищитись до

Таблиця 3 – Температурні режими гуми типу ІРП

Модифікація гуми	ІРП-1265	ІРП-1267	ІРП-1338	ІРП-1314
Деформація, %	10 - 20	11 - 19	13 - 16	10 - 20
Мінімальна робоча температура, °С	-60	-60	-60	-60
Максимальна робоча температура, °С	+250	+250	+250	+300
Припустиме короткочасне перегрівання, °С	40	40	35	30

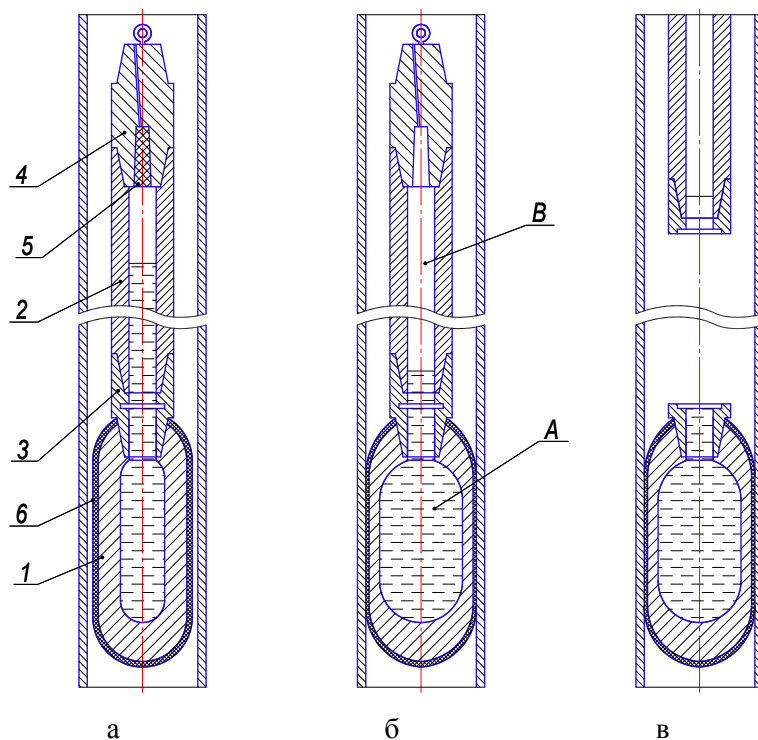


Рисунок 3 – Пакер ВПКЗ у готовому до застосування стані (а), після деформації вибухом (б) та після від'єднання частин, що повертають (в)

350-550 °С і залишатись на цьому рівні впродовж часу, поки не відбудеться теплопередача в навколишнє середовище. А це вже за межами припустимого для гуми короткочасного перегрівання.

Підіб'ємо підсумок. Оптимізація вибухового оболонкового пакера із пластичного матеріалу безпосередньо пов'язана з усуненням температурного впливу на оболонку пакера продуктів згоряння порохового заряду.

Вирішення цієї задачі є ключем до розв'язання всього комплексу питань, варіантом якої може бути використання вибухового пакера з видаленою камерою згоряння (далі ВПКЗ), у якому згоряння порохового заряду відбувається у видаленій і теплоізолюваній від оболонки пакера камері згоряння, а передача енергії вибуху відбувається через розділовий стовп рідини.

Устрій і принцип роботи такого пакера наведено на рис. 3. Пакер містить пластичний оболонковий корпус 1, камеру згоряння 2, розривний роз'єднувальний замок 3, кришку 4 із зарядом вибухової речовини 5. Кришка має

підвіску для з'єднання з геофізичним кабелем і електрозапальник. Корпус пакера може бути одягнений у гумовий електроізолюючий чохол 6. Камера згоряння може бути виконана з обважненої бурильної труби, що має підвищений розривний опір. У пакера ВПКЗ камера згоряння із кришкою й кабельною підвіскою є частиною, що повертається із свердловини і використовується багаторазово, а пластичний корпус і роз'єднувальний замок частинами одноразового використання, що незворотно деформуються.

Відмінність принципу встановлення пакера ВПКЗ від пакера ВП полягає у тому, що пороховий заряд пакера ВПКЗ спрацьовує в видаленій камері згоряння, а його енергія передається до оболонки пакера через стовп води. Горіння відбувається в змінному розрахунковому об'ємі В, що регулюється рівнем стовпа води А. За рахунок видалення камери згоряння пакера від оболонки корпусу камера тепло, виділене при згорянні порохового заряду, розсіюється крізь протяжну стінку камери згоряння в навколишнє середовище. Розрахунковими методами можна домогтися такої довжини камери згоряння, за

якої температурний вплив продуктів згоряння на оболонку корпусу перебуватиме в припустимих межах і не призводитиме до її перегрівання.

Таким чином, значна за довжиною камера згоряння відіграє роль "довгої ручки розпеченої сковорідки", тобто, теплоізолятора. На практиці довжина камери згоряння може бути порівнянна з довжиною обважненої бурильної труби, з якої вона виконана. А довжина пакера з камерою згоряння може бути обмежена тільки довжиною камери лубрикатора на усті свердловини. Енергетичні витрати пакера ВПКЗ незначно вище чим у пакера ВП, за рахунок енергії, затрачуваної на подолання інерції й гідравлічного опору стовпа робочої рідини.

### **Висновки**

Оптимізація вибухового оболонкового пакера із пластичного матеріалу типу ВП полягає в вирішенні таких завдань: підвищення надійності розмежування пластів за рахунок усунення затрубних перетікань місцями ушкодження заколонного цементного каменю; підвищення надійності розмежування пластів за рахунок усунення перетікань місцями ушкодження внутрішньої стінки експлуатаційної колони; збільшення часу надійної роботи пакера шляхом створення захисту днища й стінок пакера від електрохімічної корозії.

Завдання оптимізації можуть бути вирішені шляхом усунення нагрівання оболонки корпусу пакера від тепла продуктів згоряння порохового заряду, а саме, за рахунок його перенесення у видалену камеру згоряння й передачі його енергії через розділову рідину.

*Завдання подальших досліджень з цього питання полягають у вивченні і оптимізації режимів передачі енергії вибуху із видаленої камери згоряння до оболонки пакера.*

### **Література**

- 1 Ашрафьян М.О. Технология разобращения пластов / М.О. Ашрафьян. – М.: Недра, 1989, 232 с.
- 2 Григорян Н.Г. Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам / Н.Г. Григорян. – М.: Недра, 1990. – 198 с.
- 3 Кутателадзе С.С. Теплопередача / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергия, 1990. – 425 с.
- 4 Синявский В.С. Коррозия и защита алюминевых сплавов / В.С. Синявский. – М.: Металлургия, 1986. – 368 с.
- 5 Шевченко А.А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии / А.А. Шевченко // Химия. – 2004. – 248 с.
- 6 Солнцев Ю.П. Материаловедение / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. – М.: Химиздат, 2007. – 660 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*09.12.10*

*Рекомендована до друку професором*

**В.Я. Грудзом**