

## ДО ПИТАННЯ ПРО ГІДРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ПРИ РУСІ БРИКЕТУ У СЕРЕДОВИЩІ РІДИНИ ТА ГАЗУ

**С.І. Ягодовський<sup>1</sup>, В.М. Світлицький<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Центр розробки родовищ вуглеводнів, ДП «Науканафтогаз», Вишневе, Київська область,  
Україна, E-mail: chezares@ukr.net  
Кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник*

<sup>2</sup> *Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна, E-mail: svetlitsky@i.ua  
Доктор технічних наук, професор*

З метою зниження енерговитрат при роботах з підвищення продуктивності нафтогазових свердловин розглянуто питання інтенсифікації видобутку вуглеводнів за шляхом застосування компакт-технологій, які передбачають збільшення продуктивності свердловини за рахунок подачі на їх вибір активних хімреагентів у вигляді брикетів або капсул. Досліджено рух брикетів або капсул у стовбурі свердловини, запропонована формула для розрахунку часу руху брикетів та визначена оптимальна геометрична форма брикетів. В якості прикладу наведено практичний досвід впровадження компакт-технології для стабілізації та підвищення видобутку природного газу на родовищах України та Республіка Польща за рахунок видалення рідини з вибоїв газових та газоконденсатних свердловин шляхом застосування брикетів конічної форми, які містять поверхнево-активну речовину.

*Ключові слова:* продуктивність свердловин, компакт-технологія, поверхнево-активна речовина, порошкоподібні кислоти у неактивній формі, інгібітори корозії та солевідкладення

## TO THE QUESTION OF HYDRODYNAMIC RESISTANCE AT BRIQUETTE MOVEMENT IN LIQUID AND GAS MEDIUM

**S.I. Yagodovsky<sup>1</sup>, V.M. Svitlytsky<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Hydrocarbon Development Center, SE «Naukanaftogaz», Vishneve, Kyiv region, Ukraine,  
E-mail: chezares@ukr.net  
PhD, Leading researcher*

<sup>2</sup> *Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine,  
E-mail: svetlitsky@i.ua  
DSc, Professor*

The problem of stabilizing and increasing the production of hydrocarbons is a topical issue today for most of the countries involved in oil and gas production. In order to reduce energy consumption in work on increasing productivity of oil and gas wells, the issues of intensification of hydrocarbon production due to the use of compact technologies, which involve increasing the productivity of the

---

© С.І. Ягодовський, В.М. Світлицький, 2019

*Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості. 2019. Випуск 3*

wells due to the supply of active chemreagents in the form of briquettes or capsules, are considered. As fillers, depending on the chosen type of well treatment technology, powder acids, surfactants, corrosion inhibitors, hydrate formation, salt deposition can be used. In the pump-compressor pipes, briquettes or capsules are fed to the outlet of the well, where the reagents they contain are activated and their or those physico-chemical technological processes of the intensification of the operation of the well-reservoir system are carried out. The effectiveness of the technological processes of compact technology depends not only on the presence and activity of chemical reagents on the well hole, but also on the sequence of introduction of briquettes or capsules into the well, and, to a large extent, from the time of their movement to the face. The motion of briquettes or capsules in the wellbore is explored, the formula for calculating the time of briquettes movement and the optimal geometric form of briquettes are determined. For technological operations using compact technology, it is recommended to use briquettes or capsules in the form of a cone with an angle at the apex of its axial section  $\alpha = 30^\circ$ . As an example, the practical experience of introducing compact technology for the stabilization and increase of natural gas extraction in the deposits of Ukraine and the Republic of Poland through the removal of liquid from the faces of gas and gas condensate wells is provided by the use of conic shaped briquettes containing the surfactant.

*Key words:* performance of wells, compact technology, surfactant, powdery acids inactive, corrosion inhibitors and saline deposition

## **К ВОПРОСУ О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ БРИКЕТА В СРЕДЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

**С.И. Ягодовский<sup>1</sup>, В.М. Светлицкий<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Центр разработки месторождений углеводородов, ДП «Науканафтогаз», Вишневое, Киевская область, Украина, E-mail: chezares@ukr.net  
Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

<sup>2</sup> *Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина, E-mail: svetlitsky@i.ua  
Доктор технических наук, профессор*

С целью снижения энергозатрат при работах по повышению производительности нефтегазовых скважин рассмотрен вопрос интенсификации добычи углеводородов путем применения компакт-технологий, предусматривающих увеличение производительности скважины за счет подачи на их забой активных химреагентов в виде брикетов или капсул. Исследовано движение брикетов или капсул в стволе скважины, предложена формула для расчета времени движения брикетов и определена оптимальная геометрическая форма брикетов. В качестве примера приведен практический опыт внедрения компакт-технологий для стабилизации и увеличения добычи природного газа на месторождениях Украины и Республики Польша за счет удаления жидкости с забоев газовых и газоконденсатных скважин путем использования брикетов конической формы, которые содержат поверхностно-активное вещество.

*Ключевые слова:* производительность скважин, компакт-технология, поверхностно-активное вещество, порошкообразные кислоты в неактивной форме, ингибиторы коррозии и солеотложений

## Вступ

Відновлення та підвищення продуктивності свердловин є однією з нагальних та важливих проблем при експлуатації родовищ нафти і газу. Для цього використовують, в залежності від потреби та умов експлуатації свердловин, різного роду технологічні процеси (Яремійчук, Яремійчук, 2007; Єгер, Рибчич, 2003; Качмар, Світлицький, 2004; Светлицкий, Ягодовский, 1998). Зазвичай, для проведення таких технологічних процесів використовують надто енергетичні засоби (гідророзрив пласта, обробка привибійної зони свердловин кислотними розчинами та розчинниками, повторна перфорація, тощо).

В той же час, світовий досвід показує, що з метою зниження енерго- та ресурсовитрат на виконання вищезгаданих заходів по підвищенню продуктивності експлуатаційних свердловин все більшого розповсюдження набуває використання так званих компакт-технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів (Світлицький, Ягодовський, Галустьян, 2001; Ягодовский, Балакиров, Светлицкий, 1989; Светлицкий, Балакиров, Ягодовский, Рябов; Светлицкий, Балакиров, Ягодовский, Абрамов, Бантуш, 1992; Зеленський, Кривуля, Зеленський, Ященко, Ягодовський, 2017).

Виконання цих технологій полягає у наступному.

У свердловину, намічену до проведення робіт з інтенсифікації її роботи, за допомогою компакт-технології, вводять так звані брикети або капсули, які являють собою сформовані у різного вигляду геометричні форми хімічні реагенти. По насосно-компресорним трубам брикети або капсули рухаються на вибій свердловини, де реагенти, які вони вміщують, активізуються і за їх допомогою здійснюються ті чи інші фізико-хімічні технологічні процеси інтенсифікації роботи системи свердловина-пласт.

В якості наповнювачів, в залежності від обраного виду технології обробки свердловини, можуть бути використані порошкоподібні кислоти, поверхнево-активні речовини, інгібітори корозії, гідратуутворення, солевідкладення.

Однак ефективність проведення технологічних процесів за компакт-технологіями залежить не тільки від наявності та активності хімреагентів на вибої свердловини, а й від послідовності введення брикетів або капсул в свердловину, а також, у значній мірі, від часу їх руху до вибою. Тому, нагальною є потреба на стадії проектування проведення компакт-технології в дослідженні руху брикетів або капсул у стовбурі свердловини.

### **Матеріали та методика дослідження**

Вирішення поставлених в роботі завдань здійснювалось на основі застосування загальнонаукових методів досліджень в рамках порівняльного, логічного та статистичного аналізу шляхом використання наступних методів досліджень:

#### **I. Емпіричний метод.**

Проведено дослідження різноманітних джерел інформації, що дозволило отримати достатній по обсягу та достовірності матеріал досліджень стосовно передового світового досвіду у сфері застосування фізико-хімічних технологій інтенсифікації видобутку нафти, природного газу та газового конденсату.

Здійснений аналіз отриманих матеріалів досліджень дав можливість зробити висновок щодо актуальності та ефективності застосування компакт-технологій для підвищення продуктивності нафтогазових свердловин.

#### **II. Теоретичний метод.**

Цей метод є основним для здійсненого даного дослідження. Він базується на математичному моделюванні гідравлічного транспорту вуглеводнів. Об'єктом моделювання є процес руху нафти і природного газу в насосно-компресорних трубах від вибою свердловин на поверхню. Функція відгуку – питомий гідравлічний опір при транспортуванні.

### **Основні результати дослідження**

Як відомо, рух брикету або капсули у стовбурі свердловини відбувається під дією сили тяжіння

$$P = mg = \rho_0 V g \quad (1)$$

де  $m$  – маса брикету або капсули, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_0$  – густина брикету або капсули, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм брикету або капсули, м<sup>3</sup>.

У свою чергу на брикет або капсулу, що знаходиться у якому небудь середовищі діє виштовхуюча сила

$$F_a = \rho V g \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Окрім того, на брикет або капсулу, при їх русі у стовбурі свердловини, діє сила гідродинамічного опору, яка залежить від форми та розмірів брикета або капсули, а також від швидкості руху та властивостей середовища, що заповнює стовбур свердловини (Рабинович, 1980; Идельчик, 2012)

$$F_s = C_x S \frac{\rho v^2}{2} \quad (3)$$

де  $C_x$  – безрозмірний коефіцієнт лобового опору;

$S$  – площа проекції брикету або капсули, яка є нормаллю до напрямку руху, м<sup>2</sup>;

$v$  – швидкість руху брикету або капсули відносно середовища, м/с.

Тоді, диференціальне рівняння руху брикету або капсули у стовбурі свердловини під дією сили тяжіння можна записати у наступному вигляді

$$m \frac{dv}{dt} = P - F_a - F_s \quad (4)$$

або

$$\frac{dv}{dt} = g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) - \frac{C_x S \rho}{2V \rho_0} v^2 \quad (5)$$

Вводячи позначення

$$A = g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{C_x S \rho}{2V \rho_0} \quad (7)$$

рівняння (5) отримає вигляд

$$\frac{dv}{dt} = A - Bv^2 \quad (8)$$

Провівши перегрупування

$$\frac{dv}{(A/B) - v^2} = B dt \quad (9)$$

та увівши заміну

$$M^2 = A/B \quad (10)$$

остаточно отримаємо рівняння (5) у вигляді

$$\frac{dv}{M^2 - v^2} = B dt \quad (11)$$

Інтегруючи диференціальне рівняння (11) отримаємо

$$\frac{v + M}{v - M} = \frac{1}{C_1} e^{2MBt} \quad (12)$$

За умови коли  $v = 0$  при  $t = 0$  постійна інтегрування буде дорівнювати (-1,0). Тоді рівняння для визначення швидкості падіння брикету або капсули у стовбурі свердловини набуде вигляду

$$v = M \frac{e^{2MBt} - 1}{e^{2MBt} + 1} \quad (13)$$

Враховуючи, що границя функції  $\frac{e^{2MBt} - 1}{e^{2MBt} + 1}$  при  $t \rightarrow \infty$  прямує до **1**, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e^{2MBt} - 1}{e^{2MBt} + 1} = 1 \quad (14)$$

то рівняння (13) для великих значень  $t$  можна переписати у вигляді

$$v = M \quad (15)$$

Як відомо

$$v = \frac{dH}{dt} \quad (16)$$

або

$$\frac{dH}{dt} = M \frac{(e^{2MBt} - 1) \pm 1}{e^{2MBt} + 1} \quad (17)$$

Інтегруючи рівняння (17) отримаємо

$$H = Mt - \frac{1}{B} \ln \frac{e^{2MBt}}{e^{2MBt} + 1} + C_2 \quad (18)$$

За умови, що стала інтегрування буде дорівнювати

$$C_2 = \frac{1}{B} \ln 0,5 \quad (19)$$

Тоді шуканий частковий розв'язок буде мати наступний вигляд

$$H = Mt - \frac{1}{B} \ln \frac{2e^{2MBt}}{e^{2MBt} + 1} \quad (20)$$

За умови коли  $t$  прямує у нескінченість, границя виразу під знаком логарифму  $\frac{2e^{2MBt}}{e^{2MBt} + 1}$  у рівнянні (20) прямує до **2**, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2e^{2MBt}}{e^{2MBt} + 1} = 2 \quad (21)$$

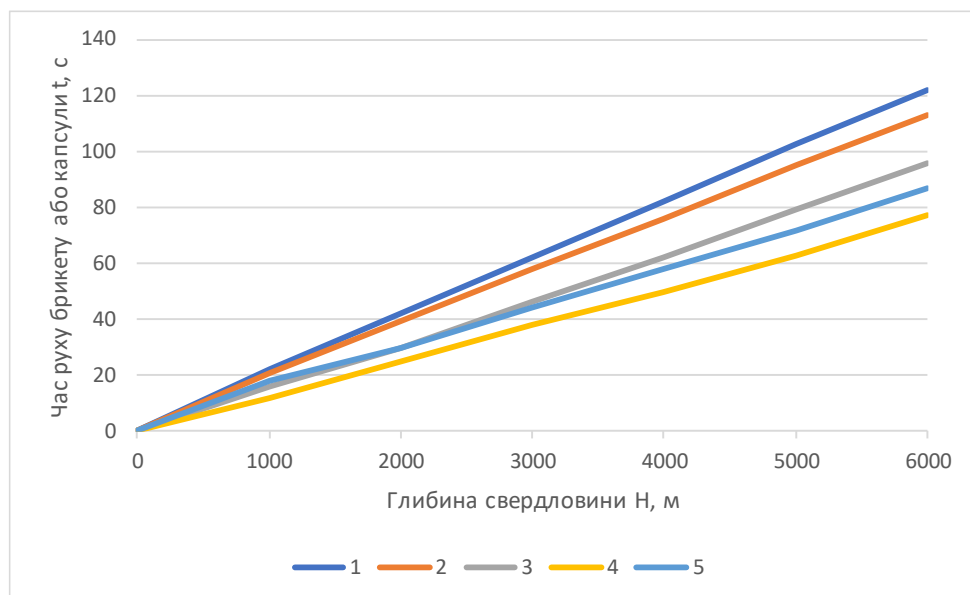
У такому випадку рівняння (20) для великих значень  $t$  можна переписати у наступному спрощеному вигляді

$$H = Mt - \frac{\ln 2}{B} \quad (22)$$

На рис. 1 наведено графіки залежності часу руху брикету або капсули різних геометричних форм (циліндр, конус, куля) у середовищі газу від глибини свердловини. Згідно з (Идельчик, 2012) для брикету або капсули у вигляді циліндру числове значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$  в залежності від співвідношення висоти циліндра  $L$  до його діаметра  $d$ , знаходиться у межах від 0,85 при  $L/d= 3,0$  до 1,0 при  $L/d= 0,5$ . Для конуса числове значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$ , в залежності від кута при вершинах осьового перерізу  $\alpha$ , знаходиться в межах від 0,35 при  $\alpha=30^\circ$  до 0,61 при  $\alpha =60^\circ$ . А для кулі числове значення коефіцієнта лобового опору  $C_x$  дорівнює 0,5.

Як можна побачити з графіків на рис. 1, найвища швидкість буде у брикета або капсули геометричною формою яких є конус з кутом при вершині його осьового перерізу  $\alpha=30^\circ$ .





**Рис. 1.** Залежність часу руху брикету або капсули різних геометричних форм від глибини свердловини:

1 – циліндр ( $Cx=1,0$ ); 2-циліндр ( $Cx=0,85$ ); 3 – конус ( $Cx=0,61$ ); 4 – конус ( $Cx=0,35$ ); 5 – куля ( $Cx=0,5$ ).

**Fig. 1.** Dependence of the time of movement of the briquettes or capsules of different geometric forms from the depth of the well:

1 - cylinder ( $Cx = 1.0$ ); 2-cylinder ( $Cx = 0.85$ ); 3 - cone ( $Cx = 0.61$ ); 4 - cone ( $Cx = 0.35$ ); 5 - ball ( $Cx = 0.5$ ).

**Табл. 1.** Результати впровадження компакт-технології експлуатації обводнених газових свердловин

**Tabl. 1.** Results of introduction of compact technology of exploitation of flooded gas wells

Номер свердловини	Штучний вибій, м	Параметри роботи свердловини						Обсяг видаленої рідини, м <sup>3</sup>
		До проведення технології			Після проведення технології			
		Тиск, МПа		Дебіт газу, тис. м <sup>3</sup> /д	Тиск, МПа		Дебіт газу, тис. м <sup>3</sup> /д	
		Трубний	Затрубний		Трубний	Затрубний		
<i>Україна, Рибальське родовище</i>								
26	1550	6,5	8	51	7,2	7,5	56	0,3
172	3500	4,3	5	24	4,6	4,7	30	1,6
170	3300	7,2	8,5	52	7,6	8	57	2,1
<i>Україна, Матлахівське родовище</i>								
30	3400	8,5	9,9	40	9	9,3	45	0,63
53	3600	5,2	9,1	45	5,8	8,7	52	0,75
<i>Польща, родовище Пиємисль</i>								
9	1500	1,95	5,05	0	2,2	4,2	17	0,45
144	2336	5,2	7,1	15	5,3	6,2	30	0,48

## Висновки

Таким чином, для проведення технологічних операцій за компакт-технологіями, можна рекомендувати використання брикетів або капсул у вигляді конуса з кутом при вершині його осьового перерізу  $\alpha=30^\circ$ .

В якості прикладу застосування компакт-технології в таблиці 1 наведено результати впровадження даної технології для стабілізації та підвищення видобутку природного газу на родовищах України та Польщі за рахунок видалення рідини з вибоїв газових та газових свердловин шляхом застосування брикетів конічної форми, які містять поверхнево-активну речовину.

## Список літератури

1. А.с. СССР № 1760095. Пенообразующий состав для удаления жидкости с забоя скважины. Светлицкий В.М., Балакиров Ю.А., Ягодovsky С.И., Абрамов Ю.Д., Бантуш В.В; опубл. в Бюл. – № 33. –1992.
2. А.с. СССР № 1623293. Способ освоения нефтяных и газовых скважин. Светлицкий В.М., Балакиров Ю.А., Ягодovsky С.И., Рябов Ю.Г.; не публ. (ДСП).
3. Єгер Д.О. Вплив стану фільтраційної характеристики привибійної зони багатощарових пластів на ефективність розробки нафтових і газових родовищ / Д.О. Єгер, І.Й. Рибчич. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – 116 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 466 с.
5. Качмар Ю.Д. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину / Ю.Д. Качмар, В.М. Світлицький. – Львів: Центр Європи, 2004. – 352 с.
6. Патент України на корисну модель № 115647. Спосіб обробки свердловини методом подачі хімічних компонентів на вибій Зеленський В.Ю., Кривуля С.В., Зеленський М.В., Яценко О.О., Ягодovsky С.І.; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.
7. Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1980. – 278 с.
8. Світлицький В.М., Ягодovsky С.І., Галустьян Г.Р. Поточний та капітальний ремонт свердловин / В.М. Світлицький, С.І. Ягодovsky С.І., Г.Р. Галустьян. – К.: Логос, 2001. – 344 с.
9. Светлицкий В.М. Стимулирование работы эксплуатационных скважин на месторождениях Джуньюанского нефтегазодобывающего объединения / В.М. Светлицкий, С.И. Ягодovsky С.И. – К.: Логос, 1998. – 43 с.
10. Ягодovsky С.И., Балакиров Ю.А., Светлицкий В.М. Вынос жидкости с забоев газовых и газоконденсатных скважин. – В кн.: Термогазодинамические процессы и системы их контроля при разведке, транспортировке и добыче нефти и газа. Харьков, 1989. – С.167-171.
11. Яремійчук Р.С. Освоєння свердловин / Р.С. Яремійчук, Я.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи, 2007. – 368 с.

## References

1. AS USSR #1760095. 1992. Foam for removal of liquid from the bottom of the well. Svetlitsky VM, Balakirov Yu.A., Yagodovsky SI, Abramov Yu.D., Bantush V.V. Bull. # 33. (In Russian).
2. AS USSR #1623293. Svetlitsky V.M., Balakirov Yu.A., Yagodovsky S.I., Ryabov Yu.G. The *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості. 2019. Випуск 3*

- method of development of oil and gas wells. Not published (restricted).
3. Eger D.O., Rybchych I.Y. 2003. Influence of the state of the filtration characteristics of the hinterland zone of multilayer layers on the efficiency of the development of oil and gas fields. Lviv. *Liga-Press*. 116 p. (In Ukrainian).
  4. Idelchik I.E. 2012. Handbook for hydraulic resistance. M. Book on Demand. 466 p. (In Russian).
  5. Kachmar Yu.D., Svetlitsky V.M. 2004. Intensity of the inflow of hydrocarbons in the well. Lviv: Center of Europe. 352 p. (In Ukrainian).
  6. Patent of Ukraine for Utility Model No 115647. 2017. Zelensky V.Yu., Krivulya S.V., Zelensky M.V., Yaschenko O., Yagodovsky S.I. Method of treatment of wells by the method of supplying chemical components on bottom. 25.04.2017 Bull. # 8. (In Ukrainian).
  7. Rabinovich E.Z. 1980. Hydraulics. M. *Nedra*. 278 p. (In Russian).
  8. Svetlitsky V.M., Yagodovsky S.I., Galustyan G.R. 2001. Current and overhaul of wells. K. *Logos*. 344 p. (In Ukrainian).
  9. Svetlitsky V.M., Yagodovsky S.I. 1998. Stimulating the operation of wellbore at the Junyuan oil and gas production fields. Kyiv. *Logos*. 43 p. (In Russian).
  10. Yagodovsky S.I., Balakirov Yu.A., Svetlitsky V.M. 1989. Removal of liquid from the bottoms of gas and gas condensate wells. In the book: Thermo-gas-dynamic processes and their control systems in exploration, transportation and production of oil and gas. Kharkiv. PP.167-171. (In Russian).
  11. Yaremychuk R.S, Yaremychuk Ya.S. 2007. Wells completion. Lviv: Center of Europe. 368 p. (In Ukrainian).