

ДО ПИТАННЯ РУХУ ПАДАЮЧОЇ СФЕРИЧНОЇ КУЛІ (СФЕРИ) В РІДИНІ ТА ПРАКТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЇЇ ПАДІННЯ В БУРОВОМУ РОЗЧИНІ

В.С. Ковальчук¹, Р.І. Стефурак²

¹ТОВ «Наукагеотех», Київ, Україна, E-mail: drillinger@gmail.com
технічний директор

²ТОВ «Наукагеотех», Київ, Україна, E-mail: agronafta@ukr.net
Кандидат технічних наук, директор

В залежності від процесів і факторів, що впливають на результат, метою роботи є визначення часу падіння сферичної кулі в буровому розчині з отриманням формули. Зроблено огляд і аналіз вивчення питання падіння сфери в рідині та визначенням коефіцієнту опору сфери, на основі якого прийнято значення коефіцієнта опору, що залежить від значення числа Рейнольдса, для використання в практичних цілях для неньютонівських рідин.

Підготовлена методика визначення часу падіння сфери в буровому розчині в залежності від розрахованого числа Рейнольдса і відношення зовнішнього діаметра сфери до внутрішнього діаметра бурових труб. Методика апробована при бурінні з відбором керну на родовищах України і може бути рекомендована для використання в інших процесах будівництва і експлуатації свердловин.

Ключові слова: визначення часу, падіння, коефіцієнт опору, число Рейнольдса, сферична куля (сфера), буровий розчин.

TO THE QUESTION OF MOTION OF A FALLING BALL (SPHERE) IN LIQUID AND PRACTICAL DETERMINATION OF THE FLIGHT TIME OF ITS IN THE DRILLING FLUID

V.S. Kovalchuk¹, R.I. Stefurak²

¹«Naukageotech» LTD, Kyiv, Ukraine, E-mail: drillinger@gmail.com
Technical Director

²«Naukageotech» LTD, Kyiv, Ukraine, E-mail: naukageotech@ukr.net
Candidate of technical sciences, Director

Depending on the processes and factors that influence the outcome, the purpose of the article is to determine the time of flight of spherical ball thru drilling mud and obtain formula of the time. A review and analysis of the issue of study of the sphere fall in liquid and determining of the drag coefficient for falling sphere on the basis of which made the value of the drag coefficient, which depends on the value of the Reynolds number, to be used for practical purposes for non-Newtonian fluids.

Prepared the method of determining the falling time of sphere in the drilling fluid, which based on the calculated Reynolds number and relation between OD of sphere to ID of drill pipes.

Method approved during coring operations on the field in Ukraine and could recommend for using in other processes of construction and production of wells.

Key words: determining the time, fall, drag coefficient, Reynolds number, spherical ball, drilling fluid

К ВОПРОСУ ДВИЖЕНИЯ ПАДАЮЩЕГО ШАРА (СФЕРЫ) В ЖИДКОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЕГО ПАДЕНИЯ В БУРОВОМ РАСТВОРЕ

В.С. Ковальчук¹, Р.И. Стефурак²

¹*ТОВ «Наукагеотех», Київ, Україна, E-mail: drillinger@gmail.com
технический директор*

²*ТОВ «Наукагеотех», Київ, Україна, E-mail: agronafta@ukr.net
Кандидат технических наук, директор*

В зависимости от процессов и факторов, влияющих на результат, целью работы является определение времени падения сферы в буровом растворе с получением формулы. Проведен обзор и анализ работ, посвященным вопросу падения сферы в жидкости и определения коэффициента сопротивления сферы, на основе которого принято значение коэффициента сопротивления, зависящего от значения числа Рейнольдса, для использования в практических целях для неньютоновских жидкостей.

Подготовлена методика определения времени падения сферы в буровом растворе, которая базируется на расчетном числе Рейнольдса и внутреннего диаметра буровых труб. Методика апробирована при бурении с отбором керна на месторождениях Украины и может быть рекомендована для использования в других процессах строительства и эксплуатации скважин.

Ключевые слова: определение времени, падение, коэффициент сопротивления, число Рейнольдса, сферический шар, буровой раствор.

Вступ

При бурінні свердловин для виконання технологічних операцій (наприклад, при відборі керна) після допуску інструменту до вибою в бурильні труби з поверхні вкидається сферична куля (надалі «сфера») для перекриття основного отвору в керновідборному снаряді і посадки в спеціальному сидлі з подальшим направленням потоку розчину поза корпусом керноприймальної труби до бурильної головки перед початком відпрацювання її на вибої для відбору керна (Мислюк, Рибчич, Яремійчук, 2002). Вкидання сфери використовується також і для приведення в робочий стан зворотніх клапанів диференційного типу при спуску обсадних колон (як приклад, зворотній клапан для автоматичного доливу компанії Weatherford модель 1112 (Мислюк, Рибчич,

Яремійчук, 2012). Активація деяких типів внутрішньосвердловинних пристроїв (підвісок хвостовиків, пакерів, муфт ГРП, опресувальних перехідників, кольматорів (Патент № 102405, 2015; Патент № 102208, 2015), ловильного інструменту (Пустовойтенко, 1988), корпусних перфораторів на НКТ (Мислюк, Рибчич, Яремійчук, 2012; Прострелочно-взрывная, 1990), що спускаються спеціально в свердловину для виконання відповідної роботи також виконується при допомозі сфери, що вкидається з поверхні на якомусь з етапів виконання конкретного технологічного процесу під час операцій будівництва свердловини.

Отже, метою даної роботи є вивчення процесів та факторів, що впливають на результат відносно руху падачої сферичної кулі (сфери) тіла в рідині для визначення часу падіння її в буровому розчині.

Матеріал та методи дослідження

Оцінка впливу гідродинамічних сил на тверде тіло у відносному русі в рідині була цікава протягом дуже довгого часу (Clift, Grace, Weber, Bubbles, 1978; Happel, Brenner, 1983; Kim, Karrilla, 2005; Lamb, 1945; Leach, Mushfique, Keen, Di Leonardo, Ruocco, Cooper, Padgett, 2009). Падаюча сфера, яка сприймає ці сили, була використана в якості елемента для вивчення властивостей ньютонівських рідин. Вимірювання граничної швидкості падіння сфери (V_t) у в'язкій рідині, що знаходиться у вузькій трубці забезпечує спосіб визначення коефіцієнта в'язкості (μ) випробувальної рідини. Цей простий, але точний метод, що використовується протягом тривалого часу, становить значний сучасний інтерес (Kahle, Winkler, Hennion, 2003; Kaiser, Graham, Mondy, 2004; Brizard, Megharfi, Mahé, Verdier, 2005; Feng, Graham, Reardon, Abbott, Mondy, 2006; Ma Jing, Lopez-Pedrosa, Bradley, 2008). Віскозиметр з падаючою кулькою є комерційно доступним і використовується для тестування нафтопродуктів, фармацевтичних напоїв, силікатного скла і харчових продуктів.

На додаток до віскозиметрії, вивчення падіння сфери грає важливу роль в багатьох інженерних областях, які включають функціонування багатофазних

потоків, наприклад, відстоювання, покращення горіння, мінімізація ерозії крапель у великих турбінах, гідродинамічної хроматографії, мембранного транспорту, гідравлічного і пневматичного транспорту великих частинок в трубах, ефекти, які використовують електричні поля для посилення явища переносу і розділень в багатофазних системах (Kaji, Mori, Tochitani, Komotori, 1980; Scott, Wham, 1988; Ptasinski, Kerkhof, 1992).

Рух падаючої сфери в рідині, що міститься у вузькій трубці, крім віскозиметрії та інших практичних застосувань, цікавий сам по собі. Ексцентричне падіння, горизонтальні сили стінок, і прискорення до стійкого стану падіння є тільки декількома прикладами багатьох цікавих аспектів фізики падаючої кулі (Happel, Brenner, 1983; Mordant, Pinton, 2000; TÖZeren, 1983; Rubinow, Keller, 1961; Shinohara, Hashimoto, 1979; Ambari, Gauthier-Manuel, Guyon, 1984; Humphrey, Murata, 1992; Becker, McKinley, Stone, 1996; Bougas, Stamatoudis, 1992; Feng, Huang, Joseph, 1996; Changfu, Haiying, Xuchang, 2003).

Віскозиметрія падаючої сфери набуває важливого значення у вивченні неньютоновських рідин, які стали дуже популярними останнім часом. Використання більш традиційних віскозиметрів, наприклад, капілярних або роторних, для нульового зсуву вимірювання зміни в'язкості неньютоновських рідин часом веде до помилок. Вимірювання при низькій швидкості зсуву є проблематичними в цих пристроях і екстраполяція до нульової швидкості зсуву є неоднозначною. Віскозиметр з падаючою кулею перевершує їх в цьому відношенні і значний обсяг робіт було зроблено в застосуванні віскозиметрії падаючої сфери для вимірювання в'язкості неньютоновських рідин, як експериментальних, так і щодо методів екстраполяції з нульовим напруженням зсуву (Kaiser, Graham, Mondy, 2004; Williams, 1965; Sutterby, 1966; Turian, 1967; Caswell, 1970; Cygan, Caswell, 1971; Subbaraman, Mashelkar, Ulbrecht, 1971; Chhabra, Uhlherr, 1979; Barnes, 1995; Barnes, 2000).

В даній роботі розглядається випадок падіння сфери у буровому розчині, як неньютонівській рідині, що базується на наступних допущеннях:

- початкова швидкість сфери дорівнює нулю і початковий розгін тіла (сфери) до початку сталого режиму потоку не враховується при розрахунку, що ведеться по максимальній можливій (граничній) швидкості падіння;
- бурильні труби в свердловині розміщені вертикально і потік, що утворюється при падінні сфери концентричний, тобто сили тертя від торкання сфери з внутрішньою стінкою труби не враховуються;
- внутрішній діаметр бурильних труб по всіх довжині прийнятий однаковим, тобто вплив муфтових з'єднань, які мають внутрішній діаметр, що відрізняється від внутрішнього діаметру самої труби в менший або в більший бік в залежності від типу з'єднання, не враховуються.

Розглядається рух сфери при падінні з середньою швидкістю U в потоці нестисливої неньютонівської рідини, яка знаходиться в стані спокою.

Основні результати дослідження

Якщо тіло рухається в буровому розчині, що має властивості в'язкопластичної рідини, то разом з ним, як одне ціле, рухається і шар рідини, що прилипає до рухомого тіла (Алешкевич, Деденко, Караваев, 1998; Леонов, Исаев, 1987; Leonov, Isaev, 2011). Цей шар внаслідок внутрішнього тертя захоплює за собою і сусідні шари. Рух рідини, що виникає при цьому, є або ламінарним або турбулентним в залежності від розмірів і форми тіла і його швидкості. Характер руху залежить також від властивостей рідини і визначається безрозмірним числом Рейнольдса (Гідравліка..., 2012; Stokes, 1851; Allen, 1900; Batchelor, 1967; Noakes, Sleigh, 2010), яке являється критерієм подібності для геометрично і механічно подібних потоків і характеризує відношення сили інерції до сили опору (Кравцов, Кравцов 2011; Chwang, Wu, 1974).

Якщо тіло, що рухається в рідині, має форму сфери діаметром d_{cf} , то число Рейнольдса визначається за формулою

$$\text{Re} = \frac{U \times d_{\text{сф}} \times \rho_{\text{розч}}}{\mu}, \quad (1)$$

де

U – швидкість падіння;

$d_{\text{сф}}$ – діаметр сфери;

$\rho_{\text{розч}}$ – густина бурового розчину;

μ – динамічна в'язкість бурового розчину.

На сферу, що падає у в'язкому розчині, діють три сили:

1) Сила тяжіння сфери

$$F_m = g \times m_{\text{сф}} = \rho_{\text{сф}} \times g \times V = \frac{1}{6} \times \pi \times \rho_{\text{сф}} \times g \times d_{\text{сф}}^3 \quad (2)$$

2) Виштовхувальна сила, яка визначається за законом Архімеда

$$F_{\text{в}} = g \times m_{\text{розч}} = \rho_{\text{розч}} \times g \times V = \frac{1}{6} \times \pi \times \rho_{\text{розч}} \times g \times d_{\text{сф}}^3 \quad (3)$$

3) Сила опору $F_{\text{оп}}$ (або внутрішнього тертя) при обтіканні, що врівноважує силу тяжіння і виштовхувальну силу, і залежить від реологічних властивостей бурового розчину, режиму обтікання, концентрації та форми тіла, що падає в рідині.

При значеннях числа Рейнольдса $\text{Re} = U \times d_{\text{сф}} \times \rho_{\text{розч}} / \mu < 1$ для визначення сили опору при обтіканні тіла справедлива формула Стокса (Stokes, 1851)

$$F_{\text{оп}} = 3 \times \pi \times \mu \times U \times d_{\text{сф}} \quad (4)$$

При падінні сфери в рідині, її швидкість змінюється відповідно до рівняння:

$$m_{\text{сф}} \times \frac{dU}{dt} = F_m - F_{\text{в}} - F_{\text{оп}} \quad (5)$$

Після закінчення деякого невеликого проміжку часу сфера отримує деяку максимальну швидкість, з якою вона практично рівномірно буде падати вниз (Определение... , 2011; Kelessidis, Mpandelis, 2003). Легко підрахувати цю швидкість, прирівнявши суму сил в правій частині рівняння (5) до нуля:

$$0 = F_m - F_g - F_{on}$$

$$\frac{1}{6} \times \pi \times \rho_{сф} \times g \times d_{сф}^3 = \frac{1}{6} \times \pi \times \rho_{розч} \times d_{сф}^3 + 3 \times \pi \times \mu \times U \times d_{сф}$$

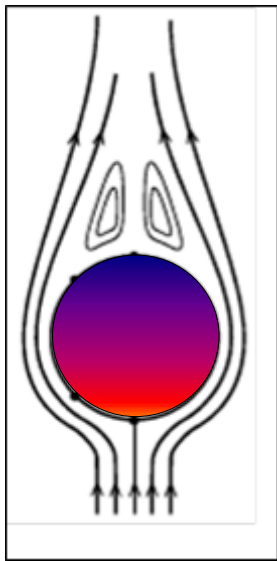
Звідки знаходимо швидкість падіння сфери:

$$U = \frac{1}{18} \times d_{сф}^2 \times g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\mu} \quad (6)$$

З даного рівняння можна визначити час падіння сфери

$$\frac{H}{t} = \frac{1}{18} \times d_{сф} \times g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\mu}$$

$$t = H \div \frac{d_{сф} \times g \times (\rho_{сф} - \rho_{розч})}{18 \times \mu} \quad (7)$$



Формули (6) і (7) справедливі для $Re < 1$ і як доказують багато дослідників (Flemmer, Banks, 1986; Owen, Ryu, 2005; Turton, Levenspiel, 1986; Brown, Lawler 2003; Nikuradse, 1933; White, 2003) експериментально до $Re = 60$ і навіть $Re = 100$. Але при швидкостях потоку, коли $Re > 100$ настає момент, коли симетрія обтікання порушується - позаду сфери виникає відрив ліній потоку (рис. 1).

Рис.1. Порушення симетрії обтікання сфери при $Re > 100$ і утворення зони завихрення

Fig. 1. Symmetry breaking sphere flow at $Re > 100$ and establishment of a twist

При таких швидкостях прикордонний шар біля поверхні сфери стає дуже тонким, а поперечні градієнти швидкості – значними по величині. Сили в'язкості, які при цьому зростають, гальмують частинки середовища потоку, хоча течія в тонкому прикордонному шарі залишається ламінарною, позаду сфери утворюються простір завихрення. Попереду сфери течія така, як і під час відсутності тертя, тому тиск по осі сфери буде рівний:

$$P_{oc} = P_o + \frac{\rho_{розч} \times U^2}{2} \quad (8)$$

В протилежній точці по осі O' (позаду сфери) буде такий самий тиск, як і в точці O , тобто $P_o = P_o'$.

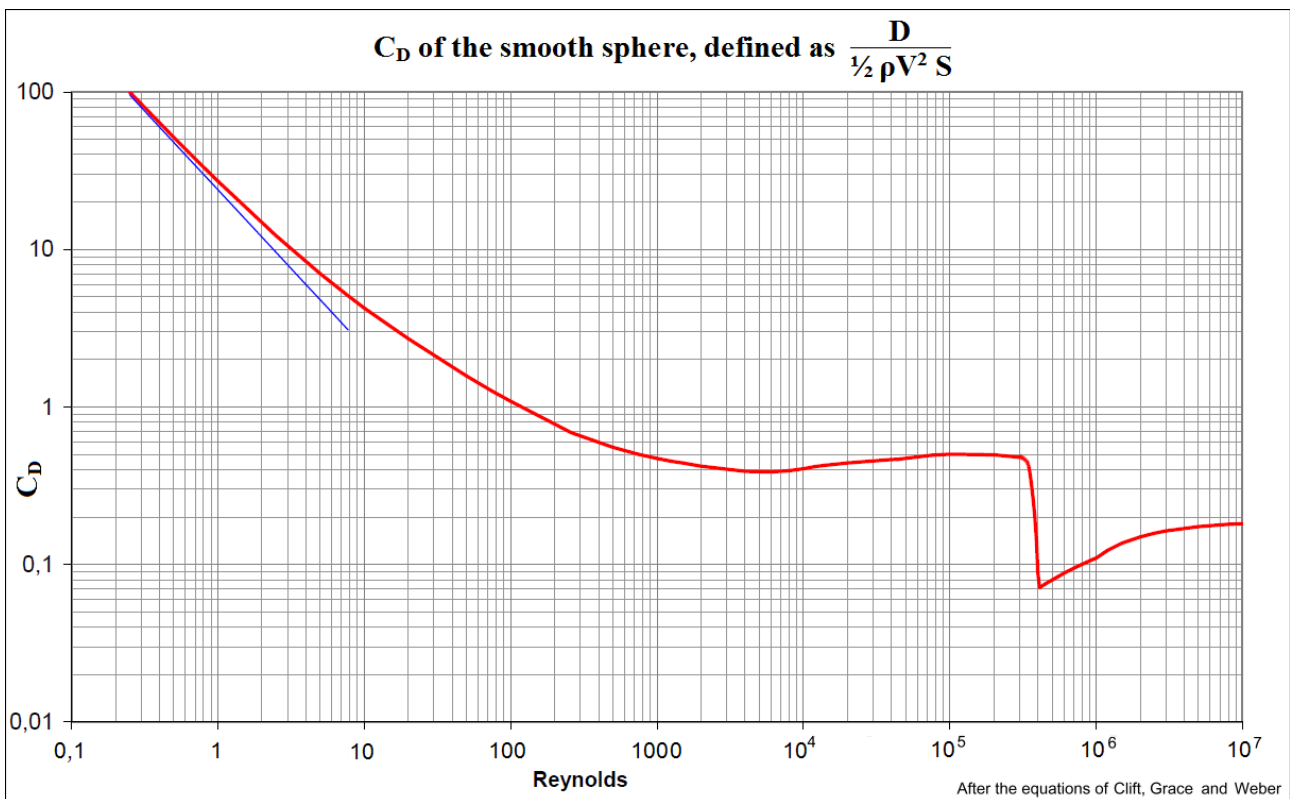
Тому результуюча сила тиску, що діє на сферу в напрямку потоку, буде пропорційна динамічному напору і площі поперечного перерізу сфери. На практиці силу лобового опору записують у вигляді

$$F_{on} = C_w \times \rho_{розч} \times S \times U^2 / 2, \quad (9)$$

де

C_w – коефіцієнт лобового опору тіла даної форми;

S – площа найбільшого перерізу тіла, який є перпендикулярним потоку.



Область квадратичної залежності сили від швидкості U простягається аж до чисел Рейнольдса $Re \sim 10^6$ (рис. 2).

Рис. 2. Залежність коефіцієнту лобового опору від числа Рейнольдса

Fig. 2. The dependence of the drag coefficient on the Reynolds

При великих швидкостях прикордонний шар поступово турбулізується і при $Re = 3 \times 10^5$ прикордонний шар стає повністю турбулентним (Алешкевич, Деденко, Караваев, 1988; Bourgoyne, Millheim, Chenevert, Young, 1991; Nikuradse, 1933). В області поступової турбулізації прикордонного шару сили опору з ростом швидкості навіть зменшуються, оскільки скорочується область зриву потоку. Проте потім квадратична залежність (8) знову відновлюється з дещо меншим коефіцієнтом C_w (табл. 1).

Таблиця 1 Застосування формул для коефіцієнтів лобового опору в залежності від діапазону чисел Рейнольдса (Clift, Grace, Weber, Bubbles, 1978; Cheng, 2009; Morrison 2013)

Table 1 Using the equations for the drag coefficient depending on the range of Reynolds numbers (Clift, Grace, Weber, Bubbles, 1978; Cheng, 2009; Morrison 2013)

Інтервал значень числа Рейнольдса	Формула для обчислення коефіцієнта лобового опору
$Re \leq 0.01$	$C_w = \frac{9}{4} + \frac{24}{Re}$
$0.01 \leq Re \leq 20$	$C_w = \frac{24}{Re} [1 + 0.1315 Re^{(0.82-0.05w)}]$ $\log_{10} \left(C_w \frac{24}{Re} - 1 \right)$ $= -0.881 + 0.82w - 0.06w^2$
$20 \leq Re \leq 260$	$C_w = \frac{24}{Re} [1 + 0.1935 Re^{0.6305}]$ $\log_{10} \left(C_w \frac{24}{Re} - 1 \right) = -0.7133 + 0.6305w$
$260 \leq Re \leq 1.5 \times 10^3$	$\log_{10} C_w = 1.6435 - 1.1242w + 0.1558w^2$
$1.5 \times 10^3 \leq Re \leq 1.2 \times 10^4$	$\log_{10} C_w = -2.4571 + 2.5558w + 0.1049w^2$
$1.2 \times 10^4 \leq Re \leq 4.4 \times 10^4$	$\log_{10} C_w = -1.9181 + 0.6370w - 0.0636w^2$
$4.4 \times 10^4 \leq Re \leq 3.38 \times 10^5$	$\log_{10} C_w = -4.3390 + 1.5809w - 0.1546w^2$
$3.8 \times 10^5 \leq Re \leq 4 \times 10^5$	$C_w = 29.78 - 5.3w$
$4 \times 10^5 \leq Re \leq 10^6$	$C_w = 0.1w - 0.49$
$10^6 \leq Re$	$C_w = 0.19 - \frac{8 \times 10^4}{Re}$

Пошук розрахункової формули коефіцієнта опору складає одну з головних проблем гідромеханіки. Багато вчених приклали зусилля для розкриття функції $C_w = f(Re)$ (Flemmer, Banks, 1986; Moody, Friction 1944; Owen, Ryu, 2005; Cheng, 2009; Turton, Levenspiel, 1986; Brown, Lawler 2003; White 2003; Morrison 2013).

Весь діапазон чисел Рейнольдса можна розділити на 10 інтервалів, і в кожному крива для коефіцієнта опору по відношенні до числа Рейнольдса розраховується відповідним чином в емпіричному вигляді рівнянь, які приведені в табл. 1. Для наведених в нижче приведеній таблиці результатів значення

$$w = \log_{10} Re \quad (10)$$

Вищеприведені формули для визначення коефіцієнту лобового опору сферичного тіла можуть бути використані для окремих сегментів показаного графіку в залежності від характеру потоку, що виражається величиною швидкості падіння, а в цілому від значень числа Рейнольдса, що характеризує рух даного тіла в рідині.

На основі експериментальних даних багатьох дослідників (Алешкевич, Деденко, Караваев, 1998; Леонов, Исаев, 1987; Lamb, 1945; Flemmer, Banks, 1986; Bohlin, 1960) в залежності від форми падаючого тіла в рідині були визначені коефіцієнти опору таких тіл, значення деяких наведено в таблиці 2.

Можна відмітити що, формула (9) переходить у формулу Стокса при значенні $C_w = 24/Re$

$$C_w \times \rho_{розч} \times S \times U^2 / 2 = \frac{24 \times \mu}{U \times d_{сф} \times \rho_{розч}} \times (\rho_{розч} \times \pi \times d_{сф}^2 / 4) \times U^2 / 2 = 3\pi \times \mu \times U \times d_{сф}$$







Якщо необхідно обчислити кінцеву швидкість падіння сфери, то ця швидкість згідно відповідних значень коефіцієнта лобового опору по таблиці 2 до числа Рейнольдса виконується у вигляді ітераційного розрахунку.

Виходячи з практичних міркувань з достатньою долею точності для області $1 < Re < 10^3$ (тобто для перших 4-х інтервалів) можливо використовувати формулу:

$$C_w = \frac{24}{Re} \times (1 + 0.17 \times Re^{0.625}) \quad (11)$$

Таблиця 2 Значення коефіцієнтів лобового опору при обтіканні тіл різної форми (Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев, 1998)

Table 2 The value of the drag coefficient while flow around bodies of different shapes (Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев, 1998)

Тіло		C_w
	диск	1.11
	напівсфера	1.35...1.40
	напівсфера	0.30...0.40
	сфера	0.4
	краплеподібне	0.045
	краплеподібне	0.1

Для області $10^3 < Re < 2 \times 10^5$ (шести інтервалів згідно таблиці 1), де значення коефіцієнта опору на графіку лежать майже в горизонтальній площині, Ньютон приймав коефіцієнт $C_w = 0.44$ (Леонов, Исаев, 1987), тому з достовірною точністю в розрахунках для скидання сферичної кулі в процесах буріння буде правильним використовувати $C_w = 0.4$.

Підставимо всі значення у формулу (5)

$$m_{cf} \times \frac{dU}{dt} = -\pi \times C_w \times \rho_{розч} \times U^2 / 2 \times (d_{cf}^2 / 4) + g \times m_{cf} - g \times m_{розч} \quad (12)$$

Розділивши обидві частини на $m_{сф}$, отримаємо

$$\frac{dU}{dt} = -A \times U^2 + g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{сф}}, \text{ де} \quad (13)$$

$$A = \pi \times C_w \times \rho_{розч} / 2 \times (d_{сф}^2 / 4) / m_{сф} = \frac{\pi}{8} \times \frac{C_w \times \rho_{розч} \times d_{сф}^2 \times 6}{\pi \times d_{сф}^3 \times \rho_{сф}}$$

$$A = \frac{3}{4} \times \frac{C_w}{d_{сф}} \times \frac{\rho_{розч}}{\rho_{сф}} \quad (14)$$

Знайдемо максимальну швидкість руху сфери, прирівнявши праву частину рівняння (13) до нуля:

$$0 = -A \times U^2 + g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{сф}}$$

$$A \times U^2 = g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{сф}}$$

$$U_{\max} = \sqrt{g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{сф}} \times \frac{4 \times d_{сф} \times \rho_{сф}}{3 \times C_w \times \rho_{розч}}}$$

$$U_{\max} = \sqrt{g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{розч}} \times \frac{4 \times d_{сф}}{3 \times C_w}} \quad (15)$$

Звідси знайдемо час падіння сфери t на висоту H

$$\frac{H}{t} = \sqrt{g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{розч}} \times \frac{4 \times d_{сф}}{3 \times C_w}}$$

$$t = H \div \sqrt{g \times \frac{\rho_{сф} - \rho_{розч}}{\rho_{розч}} \times \frac{4 \times d_{сф}}{3 \times C_w}} \quad (16)$$

На основі попередньо викладеного, підготовлена методика спрощеного визначення часу падіння сфери в буровому розчині для використання в практичних цілях, яка полягає в наступному:

1. Визначається максимальна швидкість падіння сфери по формулі (15) при наявності всіх вихідних даних (як показано далі в наведених прикладах).

2. За отриманим результатом визначається число Рейнольдса по формулі (1) і визначається область використання коефіцієнта C_w :

а) Якщо $Re < 100$, то необхідно провести перерахунок швидкості по формулі (5) з врахуванням формули Стокса;

б) При $100 < Re < 10^3$ необхідно для підрахунку C_w використовувати формулу (11), і виконати перерахунок швидкості по формулі (15) з врахуванням отриманого коефіцієнту C_w ;

в) Якщо отримане значення числа Рейнольдса знаходиться в межах $10^3 < Re < 2 \times 10^5$, то розрахунок швидкості по формулі (15) проведений правильно з врахування коефіцієнту лобового опору $C_w = 0.4$.

3. Після цього визначається час падіння сфери по формулі (7), якщо $Re < 100$ (п.2а) і по формулі (16) згідно п.2б і п.2в.

4. Для врахування впливу стінок і внутрішнього діаметру бурильних труб (Francis, 1933; DiFelice, 1996) на швидкість і час падіння сфери необхідно знайти коефіцієнт обмеженості по відношенню $d_{сф}/d_{вн}$ і по залежності $k_c = f(d_{сф}/d_{вн})$ (рис. 3), які отримано експериментально при різних режимах потоку (Леонов, Исаев, 1987).

5. Визначається уточнена швидкість падіння сфери з врахуванням коефіцієнта обмеженості k_c по формулі :

$$U_{\text{уточн}} = U_{\text{max}} / k_c \quad (17)$$

6. Визначається уточнений час по формулі:

$$t_{\text{уточн}} = H / U_{\text{уточн}} \quad (18)$$

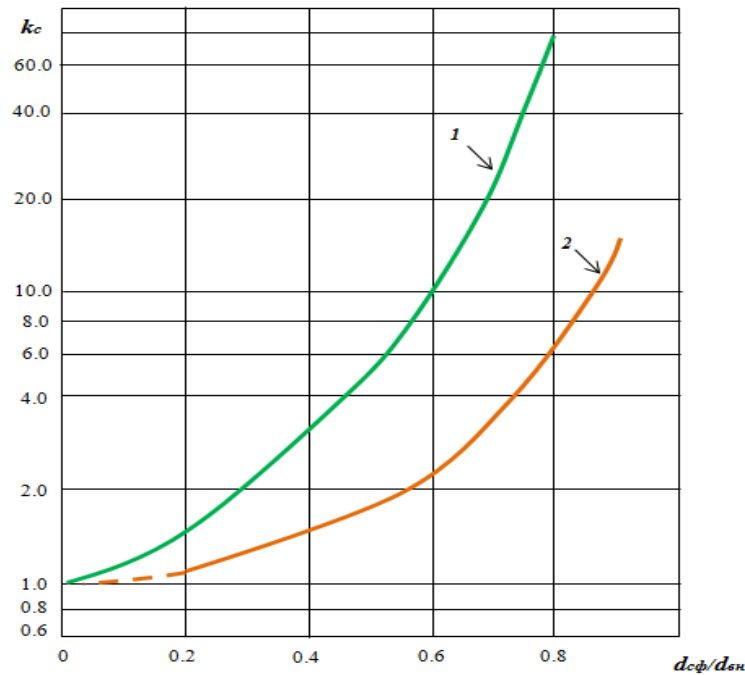


Рис. 3. Залежність коефіцієнта обмеженості k_c від відношення d_{cf}/d_{vn} при ламінарному (1) і турбулентному (2) обтіканні

Fig. 3. Dependence of the scarcity of the ratio $k_c d_{cf}/d_{vn}$ in laminar (1) and turbulent (2) flow around

Для наочності використання методики розглянемо наступні приклади:

Приклад 1

Глибина свердловини:	$H = 3500 \text{ м}$
Густина бурового розчину:	$\rho_{розч} = 1650 \text{ кг/м}^3$
Динамічна в'язкість розчину:	$\mu = 0.02 \text{ Па} \times \text{с}$
Динамічне напруження зсуву:	$\tau = 9.6 \text{ Па}$
Діаметр сфери:	$d_{cf} = 0.05 \text{ м}$
Густина матеріалу сфери:	$\rho_{сф} = 7800 \text{ кг/м}^3$
Внутрішній діаметр бурильної труби:	$d_{vn} = 0.109 \text{ м}$

1. По формулі (15) максимальна швидкість при усталеному режимі падіння сфери буде:

$$U_{\max} = \sqrt{9.81 \times \frac{7800 - 1650}{1650} \times \frac{4 \times 0.05}{3 \times 0.4}}$$

$$U_{\max} = 2.47 \text{ м/с}$$

2. Визначимо число Рейнольдса по формулі (1) при отриманій швидкості:

$$Re = 2.47 \times 0.05 \times 1650 / 0.02 = 10189$$

Тобто, отриманий результат підтверджує, що число Рейнольдса знаходиться в області $1 < Re < 2 \times 10^5$, де нами приймається $C_w = 0.4$, що використовувався для підрахунку.

3. Час падіння сфери по формулі (16) буде:

$$t = 3500 \div \sqrt{9.81 \times \frac{7800 - 1650}{1650} \times \frac{4 \times 0.05}{3 \times 0.4}}$$

$$t = 1418 \text{сек} = 23.6 \text{хв}$$

4. Для врахування впливу внутрішнього діаметру бурильних труб знайдемо відношення $d_{сф}/d_{вн}$:

$$\frac{d_{сф}}{d_{вн}} = \frac{0.05}{0.109} = 0.459$$

По отриманому значенню на рис.3 знаходимо $k_c = 1.65$.

5. Швидкість з врахуванням обмеженості потоку від впливу внутрішнього діаметру бурильних труб буде:

$$U_{уточн} = 2.47 / 1.65 = 1.5 \text{ м/с}$$

6. Уточнений час падіння сфери:

$$t_{уточн} = 3500 / 1.5 = 2333 \text{сек} = 38.9 \text{ хв.}$$

Приклад 2

Глибина свердловини:	H	$= 1000 \text{ м}$
Густина бурового розчину:	$\rho_{розч}$	$= 1300 \text{ кг/м}^3$
Динамічна в'язкість розчину:	μ	$= 1 \text{ Па} \times \text{с}$
Динамічне напруження зсуву:	τ	$= 9.6 \text{ Па}$
Діаметр сфери:	$d_{сф}$	$= 0.03 \text{ м}$
Густина матеріалу сфери:	$\rho_{сф}$	$= 7800 \text{ кг/м}^3$
Внутрішній діаметр бурильної труби:	$d_{вн}$	$= 0.109 \text{ м}$

1. Швидкість за формулою (15) буде дорівнювати:

$$U_{\max} = \sqrt{9.81 \times \frac{7800 - 1300}{1300} \times \frac{4 \times 0.03}{3 \times 0.4}} = 2.21 \text{ м/с}$$

2. Визначимо число Рейнольдса по формулі (1) при отриманій швидкості:

$$Re = 2.21 \times 0.03 \times 1300 / 1 = 86$$

Так як отримане число Рейнольдса знаходиться в області $Re < 100$, то необхідно провести перерахунок по формулі (6):

$$U_{\max} = \frac{1}{18} \times 0.03^2 \times 9.81 \times \frac{7800 - 1650}{1} = 3.02 \text{ м/с}$$

3. За формулою (7) час падіння з врахуванням перерахованої швидкості буде:

$$t = 1000 \div 3.02 = 331 \text{ сек} = 5.5 \text{ хв}$$

4. Відношення діаметра сфери до внутрішнього діаметра труби:

$$\frac{d_{\text{сф}}}{d_{\text{вн}}} = \frac{0.03}{0.109} = 0.275 \text{ по залежності } k_c = f(d_{\text{сф}}/d_{\text{вн}}), k_c = 1.25$$

5. Уточнена швидкість від впливу внутрішнього діаметру:

$$U_{\text{уточн}} = 3.02 / 1.25 = 2.42 \text{ м/с}$$

6. Уточнений час падіння сфери від впливу внутрішнього діаметру:

$$t_{\text{уточн}} = 1000 / 2.42 = 413 \text{ сек} = 6.9 \text{ хв}$$

Розрахунок часу падіння сфери (згідно Леонов, Исаев, 1987)

Для порівняння результатів з раніше відомих джерел використаємо дані прикладу 1.

Приклад 3

Глибина свердловини:	$H = 3500 \text{ м}$
Густина бурового розчину:	$\rho_{\text{розч}} = 1650 \text{ кг/м}^3$
Динамічна в'язкість розчину:	$\mu = 0.02 \text{ Па} \times \text{с}$
Динамічне напруження зсуву:	$\tau = 9.6 \text{ Па}$
Діаметр сфери:	$d_{\text{сф}} = 0.05 \text{ м}$

Густина матеріалу сфери: $\rho_{сф} = 7800 \text{ кг/м}^3$

Внутрішній діаметр бурильної труби: $d_{вн} = 0.109 \text{ м}$

Знайдемо числа: He , $Re_{кр}$, $Ar_{кр}$ і Ar

1. Знайдемо критерій Архімеда

$$Ar = \frac{d_{сф}^3 \times g}{\mu^2} \times \rho_{розч} \times (\rho_{сф} - \rho_{розч}) = \frac{0.05^3 \times 9.81}{0.02^2} \times 1650 \times (7800 - 1650) = 3.11 \times 10^7$$

2. Визначимо число Хедстрема

$$He = \frac{\tau \times d_{сф}^2 \times \rho_{розч}}{\mu^2} = \frac{9.6 \times 0.05^2 \times 1650}{0.02^2} = 99000$$

3. Критичне число Рейнольдса визначається за формулою

$$Re_{кр} = 30 \times \left(1 + \sqrt{1 + \frac{He}{45}}\right) = 30 \times \left(1 + \sqrt{1 + \frac{99000}{45}}\right) = 1437$$

4. Критичне число Архімеда

$$Ar_{кр} = 18 \times \left(Re_{кр} + \frac{He}{3}\right) = 18 \times \left(1437 + \frac{99000}{3}\right) = 619866 = 6.2 \times 10^5$$

5. Так як $Ar = 3.11 \times 10^7 > Ar_{кр} = 6.2 \times 10^5$, то швидкість U визначимо за наступною формулою

$$U = \frac{1.83 \times Ar^{0.5} \times \mu}{d_{сф} \times \rho_{розч}} = \frac{1.83 \times (3.11 \times 10^7)^{0.5} \times 0.02}{0.05 \times 1650} = 2.47 \text{ м/с,}$$

що співпадає з визначеною максимальною швидкістю за формулою (15) у наведеному прикладі 1.

6. Відношення діаметра сфери до внутрішнього діаметра труби

$$\frac{d_{сф}}{d_{вн}} = \frac{0.05}{0.109} = 0.459,$$

по залежності $k_c = f(d_{сф}/d_{вн})$ на рис.3 знаходимо k_c , який дорівнює 1.65.

7. Уточнена швидкість

$$Un = 2.47 / 1.65 = 1.5 \text{ м/с}$$

8. Час падіння при висоті падіння 3500м буде

$$t = 3500 / 1.5 = 2333 \text{ сек} = 38.9 \text{ хв,}$$

що співпадає з результатом розрахованим згідно запропонованої методики.

Висновки

1. Зроблено огляд і аналіз вивчення питання руху (падіння) сфери в рідині та визначення коефіцієнту опору сфери.
2. На основі аналізу питання руху сфери в рідині прийнято значення коефіцієнта опору, що залежить від значення числа Рейнольдса, для використання в практичних цілях.
3. Визначено формули для знаходження значення швидкості падіння сфери в залежності від характеру потоку рідини.
4. Підготовлено методику спрощеного визначення часу падіння сфери в буровому розчині в залежності від числа Рейнольдса і внутрішнього діаметру труб, результати якої співпадають з раніше відомими джерелами.
5. Результати випробування запропонованої розрахункової методики практично в межах статистичної похибки також збігаються з практичними результатами при відборі керн на свердловинах родовищ вуглеводнів України.
6. Запропонована методика може бути рекомендована для використання інженерними працівниками для практичних цілей з використанням сферичних куль (сфер) при проведенні відповідних процесів під час операцій будівництва та експлуатації свердловини (буріння, закінчування, випробування, освоєння).

Список літератури

1. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Механика сплошних сред. – М.: Физический факультет МГУ, 1998. – 131 с.
2. Возняк Л.В., Гімер П.Р., Мердох М.І., Паневник О.В. Гідравліка: навчальний посібник – Івано-Франківськ: ІФТУНГ, 2012. – 327 с.
3. Кравцов М.В., Кравцов А.М. Характер движения и скорости свободно падающих одиночных шаров в жидкостях / Энергетика. (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 2. – С. 80-87.
4. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроаэромеханика в бурении. – М.: «Недра», 1987. – 304 с.
5. Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин: Довідник: У 5-ти томах. Т2. Промивання свердловин. Відпрацювання доліт – К.: Інтерпрес ЛТД. – 2002. – 303 с.
6. Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин: Довідник: В 5-ти томах. Т4. Закінчування свердловин.– К.: Інтерпрес ЛТД. – 2012. – 608 с.
7. Определение вязкости жидкости методом Стокса: методические указания / сост.: С.С. Никулин, А.С. Чех. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 12 с.
8. Патент № 102405, Україна. Пристрій для поінтервального промивання затрубного простору / Чудик І.І., Бейзик О.С., Кирчей О.І. та ін. – Опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.
9. Патент № 102208, Україна. Пристрій для поінтервального промивання затрубного простору // Чудик І.І., Бейзик О.С., Кирчей О.І. та ін. – Опубл. 26.10.2015, Бюл. №20.
10. Прострелочно-взрывная аппаратура. Справочник под ред. Л.Я. Фридляндера, М.: Недра, 1990. – 278с.

11. Пустовойтенко И.П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 279 с.
12. Allen H.C. 1984. The Motion of a sphere in a viscous Fluid. Philosophical Magazine, L., 1900.
13. Ambari A., Gauthier-Manuel B. and Guyon E. 1984. Wall effects on a sphere translating at constant velocity. J. Fluid. Mech. 149. P. 235-253.
14. Batchelor G.K. 1967. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. 615 p.
15. Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E. and Young F.S. 1991. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers. Richardson, 1986, 2nd printing . 502 p.
16. Brown P.P., Lawler D.F. 2003. Sphere drag and settling velocity revisited. J. Envir. Eng. ASCE, 129. P. 222-231.
17. Becker L.E., McKinley G.H. and Stone H.A. 1996. Sedimentation of a Sphere Near a Plane Wall: Weak Non-Newtonian and Inertial Effects. J. of Non Newtonian Fluid Mech. 63. P. 201-233.
18. Bougas A. and Stamatoudis M. 1992. Wall factor for acceleration and terminal velocity of falling spheres at high reynolds numbers. Chemical Engineering & Technology. 16. P. 314-317.
19. Barnes H.A. 1995. A review of the slip (wall depletion) of polymer-solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers-its cause,character and cure. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 56. P. 221-251.
20. Barnes H.A. 2000. Measuring the viscosity of large-particle (and flocculated) suspensions – a note on the necessary gap size of rotational viscometers. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 94. P. 213-217.
21. Brizard M., Megharfi M., Mahé E. and Verdier C. 2005. Design of a high precision falling ball viscosimeter. Review of Scientific Instruments. 76. P. 25-109.
22. Bohlin T. 1960. On the drag on rigid spheres, moving in a viscous liquid inside cylindrical tubes. Trans. Roy. Inst. Technol. (Stockholm). 155. P.1-63.
23. Clift R., Grace J. and Weber M.E. 1978. Bubbles, Drops and Particles. New York, Academic Press. 1. Table. 5.2. P. 223.
24. Changfu Y., Haiying Q. and Xuchang X. 2003. Lift force on rotating sphere at low Reynolds numbers and high rotational speeds. Acta Mechanica Sinica. 19. P. 300-307.
25. Caswell B. 1970. The effect of finite houndaries on the motion of particles innon-Newtonian fluids. Chem. Eng. Science. 25. 1167-1176.
26. Cygan D.A., Caswell B. 1971. Precision Falling Sphere Viscometry Journal of Rheology. Journal of Rheology. 15. P. 663-683.
27. Chabra R.P. and Uhlherr P.H. 1979. Estimation of zero shear viscosity of polymer solutions from falling sphere data . Rheol. Acta. 18. P. 593-599.
28. Chwang A. and Wu T. 1974. Hydromechanics of low-Reynolds-number flow. Part 2. Singularity method for Stokes flows. J. Fluid Mech. 62(6). P. 787-815.
29. Cheng N.S. 2009. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles. Powder Technol. 189. P. 395-398.
30. DiFelice R. 1996. A relationship for the wall effect on the settling velocity of a sphere at any flow regime. Int. J. Multiphase Flow. 22. P. 523-527.
31. Francis A.W. 1933. Wall Effect in Falling Ball Method for Viscosity. Physics 4. P. 403-406.
32. Flemmer P.L.C., Banks C.L. 1986. On the drag coefficient a sphere. Powder Technology, 48(3). P. 217-221.
33. Feng J., Huang P.Y., Joseph D.D. 1996. The motion and interaction of solid particles in viscoelastic liquids. J.of Non Newtonian Fluid Mech. 63. P. 63-88.
34. Feng S, Graham A.L., Reardon P.T., Abbott J., Mondy L. 2006. Improving falling ball test for viscosity determination. J. Fluid Engineering. 128. P.157-163.
35. Happel J. and Brenner, H. 1983. Low Reynolds number Hydrodynamics. Martinus Nijhoff, The Hague. P. 319 a, 7-4b.

36. Humphrey J.A.C. and Murata H. 1992. On the Motion of Solid Spheres Falling Through Viscous Fluids in Vertical and Inclined Tubes. *J. Fluid Engineering*. 114. P. 2-11.
37. Kim S. and Karrilla S.J. 2005. *Microhydrodynamics: Principles and Selected Applications*. Dover Publications. New York. 507 P.
38. Kahle A., Winkler B., Hennion B. 2003. Is Faxén's correction function applicable to viscosity measurements of silicate melts with the falling sphere method. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 112. P. 203-215.
39. Kaiser A.E., Graham A.L and Mondy L.A. 2004. Non-Newtonian Wall Effects in Concentrated Suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 116. P. 479-488.
40. Kaji N., Mori Y.H., Tochitani Y., Komotori K. 1980. Augmentation of direct contact heat transfer to drops with an intermittent electric field. *Trans. ASME*. 102. P. 32-37.
41. Kelessidis V.C., Mpandelis G. 2003. Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling. *SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference*. Houston. P. 1-15.
42. Lamb H. 1945. *Hydrodynamics*. Dover. New York. 762 p.
43. Leach J., Mushfique H., Keen S., Di Leonardo R., Ruocco G., Cooper J.M and Padgett M.J. 2009. Comparison of Faxén's correction for a microsphere translating or rotating near a surface. *Physical review*. 026301.
44. Leonov E., Isaev V. 2011. *Applied Hydro-Aeromechanics in Oil and Gas Drilling*. Wiley. 472 p.
45. Ma Jing, Lopez-Pedrosa J.M, and Bradley M. 2008. High-throughput viscosity determinations. *Review of Scientific Instruments* 79. 094102 (1-7).
46. Mordant N., Pinton J.F. 2000. Velocity measurement of a settling sphere. *Eur. Phys. J.B.* 18. P. 343-352.
47. Moody F.L. 1944. Friction Factor in Pipe Flow. *Transactions of the Association of Mechanical Engineers*. Vol. 66. P. 671-681.
48. Morrison F.A. 2013. *Introduction to Fluid Mechanics*. Cambridge University Press. New York. 940 p.
49. Noakes C., Sleight A. 2010. *Real Fluids. An Introduction to Fluid Mechanics*. University of Leeds.
50. Nikuradse J. 1933. Strömungsgesetze in rauhen Röhren, *Forschungsheft*. Verein deutsche Ingenieure. No. 361.
51. Owen J.P., Ryu W.S. 2005. The effects of linear and quadratic drag on falling spheres: an undergraduate laboratory. *Eur. J. Phys.* 26. P. 1085-1091.
52. Ptasinski K.J., Kerkhof P.J.A.M. 1992. Electric field driven separations: Phenomena and applications. *Sep. Sci. Technol.* 27. P. 995-1021.
53. Turian R.M. 1967. An experimental investigation of the flow of aqueous non-Newtonian high polymer solutions past a sphere. *AIChE Journal*. 13. P. 999-1006.
54. Rubinow S.I. and Keller J.B. 1961. The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. *J. of Fluid Mech.*, 11. P. 447-459.
55. Stokes G.G. 1851. On the effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion Pendulum *Trans. Camb. Phil. Soc.* 8, 9. 86 p.
56. Shinohara M. and Hashimoto H. 1979. The lateral force on a small sphere sedimenting in a viscous fluid bounded by a cylindrical wall. *J. Phys. Soc. Japan*, 46. P. 320-327.
57. Scott T.C., Wham R.M. 1988. Surface area generation and droplet size control in solvent extraction systems utilizing high intensity electric fields. U.S. Patent 4767515.
58. Subbaraman V., Mashelkar R.A. and Ulbrecht J. 1971. Extrapolation procedures for zero shear viscosity with a falling sphere viscometer. *Rheol. Acta*. 10. P. 429-433.
59. Sutterby J.L. 1966. Laminar converging flow of dilute polymer solutions in conical sections: Part I. Viscosity data, new viscosity model tube flow solution. *AIChE J.* 12. P. 62-69.

60. Turton R. & Levenspiel O. 1986. A short note on the drag correlation for spheres. Powder Technol. Vol. 47. P. 83-86.
61. TOzeren. H. 1983. Drag on eccentrically positioned spheres translating and rotating in tubes. J. Fluid Mech. 129. P. 77-90.
62. Williams M.C. 1965. Normal stress and viscosity measurements for polymer solutions in steady cone-and-plate shear. AIChE Journal. 11. P. 467-473.
63. White F.M. 2003. Fluids Mech. McGraw-Hill Higher Education. 885 p.

References

1. Aleshkevich V.A., Dedenko L.G., Karavaev V.A. 1998. Continuum Mechanics. M.: Physics Department of Moscow State University. 131 p. (In Russian)
2. Wozniak L.V., Hymera P.R., Merduh M.I., Panevnyk A.V. 2012. Hydraulics. Tutorial. Ivano-Frankivsk: IFTUNH. 327 p. (In Ukrainian)
3. Kravtsov M.V., Kravtsov A.M. 2011. The nature and speed of freely falling balls in a single liquid. Energy. Math. Executive. Proc. institutions and energy. associations of the CIS. № 2. P. 80-87. (In Russian)
4. Leonov E.G., Isayev V.I. 1987. Drilling fluid mechanics. M. Nedra. 304 p. (In Russian)
5. Myslyuk M.A., Rybchych I.Y., Yaremiychuk R.S. 2002. Drilling: Reference: In 5 volumes. T.2. Flushing holes. Testing bits. K. Interpress LTD. 303 p. (In Ukrainian)
6. Myslyuk M.A., Rybchych I.Y., Yaremiychuk R.S. 2012. Drilling: Reference: In 5 volumes. T 4. Ends well – K. Interpress LTD. 608 p. (In Ukrainian)
7. Determination of the viscosity of the liquid by Stokes guidelines. Comp. Nikulin S.S., Czech A.S. Tambov. Publishing House of the GOU VPO TSTU 2011. 12 p. (In Russian)
8. Patent # 102405. 26.10. 2015. Ukraine. Device for washing pointervalnoho annulus. Chudik I.I., Beyzyk O.S., Kyrchiv O.I. et al. Publish. Bull. # 20. (In Ukrainian)
9. Патент # 102208. Україна. 26. 10. 2015. Ukraine. Device for interval standardized washing annulus. Chudik I.I., Beyzyk O.S., Kyrchiv O.I. et al. Publish. Bull. # 20. (In Ukrainian)
10. Shooting-blasting equipment. 1990. Handbook ed. Friedlander L.Y., M. Nedra. 278 p. (In Russian)
11. Pustovojtenko I.P. 1988. Prevention and elimination of accidents in drilling. 3rd ed. Rev. and ext. M. Nedra. 279 p. (In Russian)
12. Allen H.C. 1984. The Motion of a sphere in a viscous Fluid. Philosophical Magazine, L., 1900.
13. Ambari A., Gauthier-Manuel B. and Guyon E. 1984. Wall effects on a sphere translating at constant velocity. J. Fluid. Mech. 149. P. 235-253.
14. Batchelor G.K. 1967. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. 615 p.
15. Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E. and Young F.S. 1991. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers. Richardson, 1986, 2nd printing. 502 p.
16. Brown P.P., Lawler D.F. 2003. Sphere drag and settling velocity revisited. J. Envir. Eng. ASCE, 129. P. 222-231.
17. Becker L.E., McKinley G.H. and Stone H.A. 1996. Sedimentation of a Sphere Near a Plane Wall: Weak Non-Newtonian and Inertial Effects. J. of Non Newtonian Fluid Mech. 63. P. 201-233.
18. Bougas A. and Stamatoudis M. 1992. Wall factor for acceleration and terminal velocity of falling spheres at high reynolds numbers. Chemical Engineering & Technology. 16. P. 314-317.
19. Barnes H.A. 1995. A review of the slip (wall depletion) of polymer-solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers-its cause, character and cure. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 56. P. 221-251.

20. Barnes H.A. 2000. Measuring the viscosity of large-particle (and flocculated) suspensions – a note on the necessary gap size of rotational viscometers. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 94. P. 213-217.
21. Brizard M., Megharfi M., Mahé E. and Verdier C. 2005. Design of a high precision falling ball viscosimeter. *Review of Scientific Instruments.* 76. P. 25-109.
22. Bohlin T. 1960. On the drag on rigid spheres, moving in a viscous liquid inside cylindrical tubes. *Trans. Roy. Inst. Technol. (Stockholm).* 155. P.1-63.
23. Clift R., Grace J. and Weber M.E. 1978. *Bubbles, Drops and Particles.* New York, Academic Press. 1. Table. 5.2. P. 223.
24. Changfu Y., Haiying Q. and Xuchang X. 2003. Lift force on rotating sphere at low Reynolds numbers and high rotational speeds. *Acta Mechanica Sinica.* 19. P. 300-307.
25. Caswell B. 1970. The effect of finite boundaries on the motion of particles in non-Newtonian fluids. *Chem. Eng. Science.* 25. 1167-1176.
26. Cygan D.A., Caswell B. 1971. Precision Falling Sphere Viscometry *Journal of Rheology.* *Journal of Rheology.* 15. P. 663-683.
27. Chabra R.P. and Uhlherr P.H. 1979. Estimation of zero shear viscosity of polymer solutions from falling sphere data. *Rheol. Acta.* 18. P. 593-599.
28. Chwang A. and Wu T. 1974. Hydromechanics of low-Reynolds-number flow. Part 2. Singularity method for Stokes flows. *J. Fluid Mech.* 62(6). P. 787-815.
29. Cheng N.S. 2009. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles. *Powder Technol.* 189. P. 395-398.
30. DiFelice R. 1996. A relationship for the wall effect on the settling velocity of a sphere at any flow regime. *Int. J. Multiphase Flow.* 22. P. 523-527.
31. Francis A.W. 1933. Wall Effect in Falling Ball Method for Viscosity. *Physics* 4. P. 403-406.
32. Flemmer P.L.C., Banks C.L. 1986. On the drag coefficient a sphere. *Powder Technology,* 48(3). P. 217-221.
33. Feng J., Huang P.Y., Joseph D.D. 1996. The motion and interaction of solid particles in viscoelastic liquids. *J. of Non Newtonian Fluid Mech.* 63. P. 63-88.
34. Feng S, Graham A.L., Reardon P.T., Abbott J., Mondy L. 2006. Improving falling ball test for viscosity determination. *J. Fluid Engineering.* 128. P.157-163.
35. Happel J. and Brenner, H. 1983. *Low Reynolds number Hydrodynamics.* Martinus Nijhoff, The Hague. P. 319 a, 7-4b.
36. Humphrey J.A.C. and Murata H. 1992. On the Motion of Solid Spheres Falling Through Viscous. Fluids in Vertical and Inclined Tubes. *J. Fluid Engineering.* 114. P. 2-11.
37. Kim S. and Karrilla S.J. 2005. *Microhydrodynamics: Principles and Selected Applications.* Dover Publications. New York. 507 P.
38. Kahle A., Winkler B., Hennion B. 2003. Is Faxén's correction function applicable to viscosity measurements of silicate melts with the falling sphere method. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 112. P. 203-215.
39. Kaiser A.E., Graham A.L and Mondy L.A. 2004. Non-Newtonian Wall Effects in Concentrated Suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 116. P. 479-488.
40. Kaji N., Mori Y.H., Tochtani Y., Komotori K. 1980. Augmentation of direct contact heat transfer to drops with an intermittent electric field. *Trans. ASME.* 102. P. 32-37.
41. Kelessidis V.C., Mpandelis G. 2003. Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling. *SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference.* Houston. P. 1-15.
42. Lamb H. 1945. *Hydrodynamics.* Dover. New York. 762 p.
43. Leach J., Mushfique H., Keen S., Di Leonardo R., Ruocco G., Cooper J.M and Padgett M.J. 2009. Comparison of Faxén's correction for a microsphere translating or rotating near a surface. *Physical review.* 026301.

44. Leonov E., Isaev V. 2011. Applied Hydro-Aeromechanics in Oil and Gas Drilling. Wiley. 472 p.
45. Ma Jing, Lopez-Pedrosa J.M, and Bradley M. 2008. High-throughput viscosity determinations. Review of Scientific Instruments 79. 094102 (1-7).
46. Mordant N., Pinton J.F. 2000. Velocity measurement of a settling sphere. Eur. Phys. J.B. 18. P. 343-352.
47. Moody F.L. 1944. Friction Factor in Pipe Flow. Transactions of the Association of Mechanical Engineers. Vol. 66. P. 671-681.
48. Morrison F.A. 2013. Introduction to Fluid Mechanics. Cambridge University Press. New York. 940 p.
49. Noakes C., Sleigh A. 2010. Real Fluids. An Introduction to Fluid Mechanics. University of Leeds.
50. Nikuradse J. 1933. Strömungsgesetze in rauhen Rohren, Forschungsheft. Verein deutsche Ingenieure. No. 361.
51. Owen J.P., Ryu W.S. 2005. The effects of linear and quadratic drag on falling spheres: an undergraduate laboratory. Eur. J. Phys. 26. P. 1085-1091.
52. Ptasinski K.J., Kerkhof P.J.A.M. 1992. Electric field driven separations: Phenomena and applications. Sep. Sci. Technol. 27. P. 995-1021.
53. Turian R.M. 1967. An experimental investigation of the flow of aqueous non-Newtonian high polymer solutions past a sphere . AIChE Journal. 13. P. 999-1006.
54. Rubinow S.I. and Keller J.B. 1961. The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. J. of Fluid Mech., 11. P. 447-459.
55. Stokes G.G. 1851. On the effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion Pendulum Trans. Camb. Phil. Soc. 8, 9. 86 p.
56. Shinohara M. and Hashimoto H. 1979. The lateral force on a small sphere sedimenting in a viscous fluid bounded by a cylindrical wall. J. Phys. Soc. Japan, 46. P. 320-327.
57. Scott T.C., Wham R.M. 1988. Surface area generation and droplet size control in solvent extraction systems utilizing high intensity electric fields. U.S. Patent 4767515.
58. Subbaraman V., Mashelkar R.A. and Ulbrecht J. 1971. Extrapolation procedures for zero shear viscosity with a falling sphere viscometer. Rheol. Acta. 10. P. 429-433.
59. Sutterby J.L. 1966. Laminar converging flow of dilute polymer solutions in conical sections: Part I. Viscosity data, new viscosity model tube flow solution. AIChE J. 12. P. 62-69.
60. Turton R. & Levenspiel O. 1986. A short note on the drag correlation for spheres. Powder Technol. Vol. 47. P. 83-86.
61. TOzeren. H. 1983. Drag on eccentrically positioned spheres translating and rotating in tubes. J. Fluid Mech. 129. P. 77-90.
62. Williams M.C. 1965. Normal stress and viscosity measurements for polymer solutions in steady cone-and-plate shear . AIChE Journal. 11. P. 467-473.
63. White F.M. 2003. Fluids Mech. McGraw-Hill Higher Education. 885 p.