

УДК 539.3  
UDC 539.3

## ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМ ГЛИБОКОГО БУРІННЯ

*Ващиліна О.В.*, кандидат фізико-математичних наук. Національний транспортний університет, Київ, Україна

## TECHNICAL ASPECTS OF THE PROBLEMS OF DEEP DRILLING

*Vashchilina O.V.*, Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

## ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМ ГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ

*Ващилина Е.В.*, кандидат физико-математических наук. Национальный транспортный университет, Киев, Украина

### Постановка проблеми

Проблеми енергетики, що найбільш гостро постають у ХХІ столітті, викликані вичерпуванням нафтових та газових ресурсів і ускладненням умов їх видобутку. У результаті тривалого нераціонального видобутку й споживання вуглеводнів за допомогою дешевих технологій, що не вимагають великих капіталовкладень, час «легких» нафти та газу закінчився у двадцятому столітті [1]. У зв'язку із цим зараз перспективними стають поклади, розташовані в сланцевих породах на глибинах порядку до 10000 м. Наприклад, у США вивчається можливість видобутку палива із глибини 30000 футів (9150 м) і ставиться мета розробки похилих і горизонтальних прибережних свердловин з віддаленням до 15 км від бурильної платформи [2].

Беручи до уваги, що у зв'язку зі збільшенням глибини й дальності проходки свердловин їх вартість уже перевищує 60 млн. доларів США [3] і аварійною є кожна третя свердловина, а надійних методик теоретичного моделювання їх функціонування до цього часу не розроблено, можна зробити висновок, наскільки важливою є проблема теоретичного прогнозування критичних станів бурильних колон (БК) і яка ціна помилки таких прогнозів.

Основними споживачами енергії у світі є [4, 5]: промисловість, транспорт, сільськогосподарський сектор, житловий сектор і сектор комерційних та суспільних послуг. Причому найбільш енергоємним є транспорт, потім промисловість і житловий сектор.

Вибір цими споживачами раціонального виду палива визначається такими шістьма основними факторами: 1) теплотворна здатність палива й енергетичної сировини; 2) легкість видобутку; 3) легкість транспортування; 4) легкість добування й використання енергії; 5) пов'язаний з ними ризик для здоров'я й життя робочого персоналу; 6) наявність відходів і можливість забруднення ними навколишнього середовища. Враховуючи ці фактори, можна припустити, що найбільш привабливими джерелами енергії в найближчі десятиліття залишатимуться нафта й газ.

Важливою обставиною, що сприяють ускладненню ситуації в нафто- і газо- промислових галузях, є те, що у звичайних умовах, зазвичай, лише 40% вуглеводних палив, які заповнюють тріщини й пори підземних резервуарів, можуть бути видобуті при застосуванні традиційної технології добування. Один зі способів збільшення обсягів, що відбираються з підземних резервуарів палива пов'язаний із проходкою криволінійних свердловин, що пронизують нафтоносні й газоносні шари уздовж їх ламінованої структури й тому покриваючих більші зони забору палива [6]. Оскільки при застосуванні такої технології зменшується загальне число прохідних колодязів і дебіт криволінійних свердловин виявляється на порядок вище дебіту вертикальних свердловин, найближчим часом буріння свердловин складної конфігурації стане основним у більшості країн світу. Удосконалюванню технологій криволінійного буріння сприяють також потреби видобутку вуглеводнів зі сланцевих порід.

Відповідно до вимог економіки, геологічним умовам залягання родовища й технологічним можливостями нафтогазових компаній у цей час бурять вертикальні, похило спрямовані, горизонтальні й багатосторонні нафтові й газові свердловини різної глибини. Однак практичне впровадження технології буріння більш глибоких свердловин різної просторової орієнтації пов'язане з необхідністю теоретичного моделювання механічних явищ, що протікають у конструкціях бурильного устаткування, з метою попередження критичних режимів їх функціонування. При цьому одним з найбільш важливих аспектів даного напрямку є теоретичне моделювання квазістатичної й динамічної поведінки колон глибокого буріння. Це завдання, однак, суттєво ускладнюється тією обставиною, що згідно з умовами геометричної подібності бурильна колона еквівалентна людській волосині, і в той же час при функціонуванні вона піддається дії інтенсивних навантажень та великої кількості різних факторів, що ускладнюють методики їх теоретичного моделювання.

Провідне значення в технології буріння нафтових і газових свердловин займає роторний спосіб, при якому різання породи здійснюється долотом, закріпленим на нижньому кінці бурильної колони, підвішеної в свердловині за верхній кінець. При цьому обертання долота здійснюється за рахунок обертання всієї бурильної колони в результаті дії на її верхній кінець приводного крутного моменту.

Бурильна колона збирається із труб довжиною 12-15 м за допомогою нарізних з'єднань. Ефективність буріння й якості проходки визначається, в основному, його режимом й компоновкою низу бурильної колони (КНБК) з опорно-центруючими елементами. Створення високих осьових навантажень, що забезпечують стабілізацію й керованість траєкторії стовбура свердловини, тісно пов'язане із застосуванням багатоопорних КНБК, кількість центруючих елементів у яких, зазвичай, не перевищує п'яти.

До складу конструкції низу бурильної колони зазвичай входять також обтяжувачі, калібратори й інші елементи.

Для видалення зі свердловини часток породи, подрібненої в результаті її різання долотом, за допомогою спеціальної насосної системи всередину колони подається промивна рідина, яка, піднімаючись потім в зовнішньому просторі між колоною і стінкою свердловини, захоплює за собою і забирає ці частинки. Промивна рідина грає також і інші важливі функціональні ролі. Відомо, що скельні породи в надрах Землі зазнають значного тривимірного напруження, викликаного всебічним стисненням силами тяжіння вищерозташованих масивів. Завдяки суцільності гірської породи, ці напруження врівноважують одне одного за типом гідростатичних сил у рідині. Однак порушення суцільності породи при бурінні свердловини призводить до перерозподілу цих напружень в околі свердловини, порушення рівноваги і обвалення породи. Якщо ж свердловину заповнити рідиною з питомою вагою, рівною питомій вазі породи, то її гідростатичний тиск на стінки врівноважить дисбаланс сил в породі, і вона збереже свою стійкість (за термінологією бурильників). При цьому важливо дотримуватися балансу між усередненою щільністю рідини і породи (особливо для глибоких свердловин). Крім того промивна рідина відіграє важливу роль у формуванні умов фрикційної взаємодії між колоною і стінкою свердловини. І нарешті, промивна рідина служить для охолодження бурового інструменту. Буріння таких свердловин відбувається на межі сучасних технологічних можливостей при граничних значеннях швидкостей, гідростатичних тисків і температур, а також параметрів міцності й зношування матеріалів бурильних колон під істотним впливом ефектів інтенсивних коливань і нестійкості всієї системи. Цілком природно, що ці процеси найчастіше супроводжуються позаштатними й аварійними ситуаціями, до яких можна віднести

- Біфуркаційне випинання (buckling) вертикальних колон по типу стиснуто-розтягнутих, закручених трубчастих стрижнів з внутрішніми потоками рідини;

- Резонансні (згинні) коливання колон;

- Самозбурення торсіонних автоколивань з швидкими і повільними рухами (slip-stick vibration) низу колони, викликане нелінійними силами тертя (різання) між долотом і зруйнованою породою;

- Нелінійні прямі і зворотні коливання кружляння (whirling vibrations) долота і низу колони, самозбурені в результаті фрикційного і кінематичного (неголономного) перекочування долота по поверхні дна свердловини;

- Свердловинах бурильних колон (dead lock states) переважно в похилих з геометричними недоскональностями, обумовлені різким зростанням сил контактного тертя між колоною і стінкою свердловини;

- Біфуркаційне випинання (buckling) колон у свердловинах з криволінійними траєкторіями, що супроводжується погіршенням провідності приводного моменту різання та осьової сили на долото, підвищенням зносу труби колони, збільшенням енергоспоживання системою, збільшення інтенсивностей полів напружень і деформацій в колонах і підвищенням ймовірності їх руйнування.

Дослідження цих ефектів здійснюється із застосуванням рівнянь поперечних коливань, колони, попередньо напруженої осьовою силою  $T$  та крутним моментом  $M_z$

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( M_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega^2 u - \\ - 2(\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega \frac{\partial v}{\partial t} + V^2 \rho_p F_p \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2V \rho_p F_p \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} + (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( M_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega^2 v + \\ + 2(\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega \frac{\partial u}{\partial t} + V^2 \rho_p F_p \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + 2V \rho_p F_p \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} + (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0.$$

Тут  $u(z, t)$ ,  $v(z, t)$  - функції поперечних переміщень колони;  $z$  - поздовжня координата;  $t$  - час,  $\omega$  - кутова швидкість обертання колони;  $V$  - швидкість течії промивної рідини,  $\rho$  - густина;  $F$  - площа поперечного перерізу каналу труби.

Розв'язування цієї системи здійснюється методом початкових параметрів. Показано, що вони мають вигляд спіральних вейвлетів, зосереджених у нижній частині колони.

Зазначимо, що в частинному випадку, коли  $v=0$  і  $\omega=0$ , а поздовжня сила  $T$  і крутий момент  $M_z$  не змінюються вздовж координати  $z$ , ця система має аналітичний розв'язок для критичних значень зовнішніх збурень  $T_{kp}$  та  $M_{kp}$ :

$$M_z^{kp} = \pm 2\sqrt{EI} \cdot \sqrt{\pi^2 \frac{EI}{L^2} + T_{kp}}.$$

Особливість цього розв'язку полягає в тому, що колона може втрачати стійкість навіть при дії розтягуючої сили  $T_{kp}$ . Цей ефект зумовлений дією крутного моменту  $M_z^{kp}$ . Однак, найбільш цікаве полягає у тому, що форма втрати стійкості, яка реалізується при цьому, має вигляд спіралі.

Виникнення зазначених позаштатних ситуацій обумовлене, в основному, трьома факторами. По-перше, це велика довжина колони. За умовами геометричної подоби вона подібна людській волосині. Тому, явища, що відбуваються на одному кінці колони можуть впливати, слабо впливати, або взагалі не впливати на явища, що відбуваються на її іншому кінці. У математиці рівняння, що описують такі явища, називаються сингулярно збуреними. Вони характеризуються погано збіжними розв'язками, форми яких мають сингулярності у вигляді крайових ефектів, або внутрішніх гармонійних сплесків (вейвлетів), а також містити нерегулярності типу розривів або зламів.

Другий фактор пов'язаний з особливим характером фрикційних ефектів, що проявляються в протяжних криволінійних свердловинах. Справа в тому, що сила тертя в них залежить від сили притискання контактуючих тіл. Але на криволінійних ділянках сила притискання колони до стінки свердловини визначається осьовою силою натягу колони. Однак при протяганні колони в свердловині необхідна для цього осьова сила зростає зі збільшенням сил тертя, а сили тертя зростають зі збільшенням осьової сили і т.д. У цьому випадку в механіці говорять, що сили тертя мають

мультиплікативну (тобто перемножуються), а не адитивну ( тобто не складаються) природу, як це буває при ковзанні тіла по шорсткуватій плоскій поверхні.

І третій фактор полягає в тому, що завдання математичного моделювання механічних явищ, що супроводжують процеси буріння, є багатопараметричними, оскільки залежать від великого числа геометричних і механічних величин. Тому досить важливим виявляється питання про розгляд реалізації цих механічних явищ при конкретних приватних значеннях визначальних величин й встановленні загальних закономірностей їх протікання. Практичне застосування методів комп'ютерного моделювання позаштатних ситуацій, що виникають при бурінні глибоких свердловин, може сприяти їхньому запобіганню.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kerr R.A. Bumpy road ahead for world's oil. // Science, 18 Nov.2005, Vol. 310.– P. 1106–1108.
2. Jonggeun Choe, Jerome J.Schubert, Hans C. Juvkam-Wold. Well-control analyses on extended-reach and multilateral trajectories - SPE Drilling & Completion. – June 2005. – P. 101–108.
3. Iyoho A.W., Meize R.A., Millheim K.K., Crumrine M.J. Lessons from integrated analysis of GOM drilling performance // SPE Drilling & Completion. – March 2005. – P. 6–16.
4. Editorial. Avoiding an oil crunch // Science. – 1999. – V.286, № 5437. – P. 47.
5. Leonardo Maugeri. Oil: never cry wolf- why the petroleum age is far from over - Science. – May 2004. – V.304.– P. 1114–1115.
6. Мислюк М.А. Буріння свердловин. Т.3, Вертикальне та скероване буріння / М.А. Мислюк, І.Й. Рибнич, Р.С. Яремійчук – Київ.:“Інтерпрес ЛТД”. – 2004. – 294с.
7. Barakat Elie R., Miska Stefan, Takach N. The effect of hydraulic vibrations on initiation of buckling and axial force transfer for helically buckled pipes at simulated horizontal wellbore conditions – SPE Drilling Conference, 20-22 February 2007, Amsterdam, Netherlands.
8. Chang, K.W., Howes F.A. Nonlinear Singular Perturbation Phenomena – Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1984.
9. Cunha, J.C. Buckling of tubulars inside wellbores: a review on recent theoretical and experimental works – SPE Drilling and Completion. – 2004. – V. 19, № 1. – P. 13 – 19.
10. Dawson, R., Paslay P.R. Drill pipe buckling in inclined holes. – J Pet Technol. – 1984. – V.36(10). – P.1734–1738.
11. Mitchell, R.F. Tubing buckling – The state of art – SPE Drilling & Completion. – 2008. – 23 (4) . – P.361–370.

#### REFERENCES

1. Kerr R.A. Bumpy road ahead for world's oil. Science, 18 Nov.2005, Vol. 310.– P. 1106–1108.
2. Jonggeun Choe, Jerome J.Schubert, Hans C. Juvkam-Wold. Well-control analyses on extended-reach and multilateral trajectories - SPE Drilling & Completion. – June 2005. – P. 101–108.
3. Iyoho A.W., Meize R.A., Millheim K.K., Crumrine M.J. Lessons from integrated analysis of GOM drilling performance - SPE Drilling & Completion. – March 2005. – P. 6–16.
4. Editorial. Avoiding an oil crunch // Science. – 1999. – V.286, № 5437. – P. 47.
5. Leonardo Maugeri. Oil: never cry wolf- why the petroleum age is far from over - Science. – May 2004. – V.304.– P. 1114–1115.
6. Myslyuk M.A., Rybchich I. Yo., Yaremiychuk R.S. Borewell Drilling – Vertical and Directed Drilling. V.3– Kyiv, Interpress LTD. – 2004. P – 294с. (Ukr)
7. Barakat Elie R., Miska Stefan, Takach N. The effect of hydraulic vibrations on initiation of buckling and axial force transfer for helically buckled pipes at simulated horizontal wellbore conditions – SPE Drilling Conference, 20-22 February 2007, Amsterdam, Netherlands.
8. Chang, K.W., Howes F.A. Nonlinear Singular Perturbation Phenomena – Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1984.
9. Cunha, J.C. Buckling of tubulars inside wellbores: a review on recent theoretical and experimental works – SPE Drilling and Completion. – 2004. – V. 19, № 1. – P. 13 – 19.

10. Dawson, R., Paslay P.R. Drill pipe buckling in inclined holes. – J Pet Technol. – 1984. – V.36(10). – P.1734–1738.

11. Mitchell, R.F. Tubing buckling – The state of art – SPE Drilling & Completion. – 2008. – 23 (4) . – P.361–370.

### РЕФЕРАТ

Ващіліна О.В. Технічні аспекти проблем глибокого буріння / О.В. Ващіліна // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).

Обговорюються основні технічні труднощі, що виникають при бурінні глибоких вертикальних і похило-спрямованих нафтових і газових свердловин. Показано, що вони обумовлені багатопараметричною залежністю технологічних режимів буріння від геометричних характеристик траєкторії свердловини, механічних властивостей скельних порід та бурильної колони, а також від силових і швидкісних параметрів процесу буріння.

Об'єктом дослідження є геометричні, кінематичні та силові характеристики, що виникають при бурінні глибоких вертикальних і криволінійних свердловин.

Мета роботи полягає в аналізі можливого впливу характеристик технологічних процесів буріння на ефекти виникнення їх позаштатних режимів.

Виконано аналіз основних технічних аспектів, які супроводжують проходку глибоких нафтових і газових свердловин. Відзначено, що їх буріння здійснюється на межі сучасних технологічних можливостей при граничних значеннях швидкостей, гідростатичних тисків і температур, а також параметрів міцності і зносу матеріалів бурильних колон під істотним впливом ефектів інтенсивних коливань і нестійкості всієї системи. Зазначено, що ці процеси часто супроводжуються позаштатними і аварійними ситуаціями, що приводять до втрати свердловини і бурильного інструменту. Відзначено основні чинники, що призводять до труднощів моделювання даних ефектів. Це велика довжина колони і фрикційні сили, що генеруються

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ГЛИБОКА СВЕРДЛОВИНА, БУРІННЯ, ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ, РЕЖИМИ.

### ABSTRACT

Vashchilina O.V. Technical aspects of the problems of deep drilling. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37).

The basical technical difficulties arising in drilling deep vertical and inclined oil and gas bore wells are discusses.

It is shown that they are conditioned by the drilling multiparametric dependence of the drilling technological regimes on geometric characteristics of the well trajectory, mechanical properties of the rock media and drill string, as well as force and velocity parameters of the drivage process.

The investigation object are the geometric, kinematic and force characteristics, appearing in that drilling of deep vertical and inclined bore wells.

Investigation target is to analyze the possible influence of the technological drilling regimes on the effects of their emergency situation generation.

The investigation methods are the algorithms of numerical computer simulation.

The analysis of basic technical aspects accompanying drivage of deep oil and gas bore wells is performed. It is noted their drilling is realized within the capability of modern technological possibilities at limit values of velocities, hydrostatic pressures and temperatures, as well as parameters of strength and wear of drill strings materials under essential influence of the intensive effects of vibration and instability of the whole system. It is noted that, as a rule, these processes are accompanied by emergency situation and failures, leading to the loss of the bore well and the drilling instrument. The basic factors. The major factors associated with the difficulties of simulation of these effects are presented. They are the large length of the drill string and the friction forces generated.

**KEYWORDS:** DEEP BORE WELLS, DRILLING, TECHNICAL PARAMETERS, EMERGENCY REGIMES.

## РЕФЕРАТ

Ващилина Е.В. Технические аспекты проблем глубокого бурения / Е.В. Ващилина // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2017. – Вып. 1 (37).

Обсуждаются основные технические трудности, возникающие при бурении глубоких вертикальных и наклонно-направленных нефтяных и газовых скважин. Показано, что они обусловлены многопараметричной зависимостью технологических режимов бурения от геометрических характеристик траектории скважины, механических свойств скальных пород и бурильной колонны, а также от силовых и скоростных параметров процесса бурения.

Объектом исследования являются геометрические, кинематические и силовые характеристики, возникающие при бурении глубоких вертикальных и криволинейных скважин.

Цель работы заключается в анализе возможного влияния характеристик технологических процессов бурения на эффекты возникновения их нештатных режимов.

Выполнен анализ основных технических аспектов, сопровождающих проходку глубоких нефтяных и газовых скважин. Отмечено, что их бурение осуществляется на пределе современных технологических возможностей при предельных значениях скоростей, гидростатических давлений и температур, а также параметров прочности и износа материалов бурильных колонн под существенным влиянием эффектов интенсивных колебаний и неустойчивости всей системы. Указано, что эти процессы зачастую сопровождаются нештатными и аварийными ситуациями, приводящими к утрате скважины и бурильного инструмента. Отмечены основные факторы, приводящие к трудностям моделирования данных эффектов. Это большая длина колонны и генерируемые трениевые силы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА, БУРЕНИЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, РЕЖИМЫ.

### **АВТОРИ:**

Ващилина Елена Валеріївна, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Україна, 01010, м. Київ, вул. Суворова 1.

### **AUTHOR:**

Vashchilina Olena.V., Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Ukraine, 01010, Kyiv, Suvorova str. 1.

### **АВТОРЫ:**

Ващилина Елена Валериевна, кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: vashchilina@ukr.net, тел. +380504132332, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1.

### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Гуляев В.І., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри вищої математики, Київ, Україна.

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Національний університет будівництва та архітектури, професор кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

### **REVIEWER:**

Gulyayev V.I., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, professor, department of Mathematics, Kyiv, Ukraine.

Gaydaychuk V.V., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National University of Building and Architecture, Kyiv, professor, department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.