

УДК 539.3  
UDC 539.3

### **ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И КРИВОЛИНЕЙНЫХ СКВАЖИНАХ**

*Горбунович И.В.*, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, [irina.gorbunovich@gmail.com](mailto:irina.gorbunovich@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-6859-0663](https://orcid.org/0000-0002-6859-0663)

*Левковская Л.В.*, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, [l\\_v\\_g@ukr.net](mailto:l_v_g@ukr.net), [orcid.org/0000-0002-5589-5257](https://orcid.org/0000-0002-5589-5257)

### **A STUDY OF THE PROBLEM OF IDENTIFYING CRITICAL STATES OF DRILL STRING IN VERTICAL AND CURVILINEAR BOREHOLES**

*Gorbunovich I.V.*, Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, [irina.gorbunovich@gmail.com](mailto:irina.gorbunovich@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-6859-0663](https://orcid.org/0000-0002-6859-0663)

*Levkivska L.V.*, Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, [l\\_v\\_g@ukr.net](mailto:l_v_g@ukr.net), [orcid.org/0000-0002-5589-5257](https://orcid.org/0000-0002-5589-5257)

### **ВИВЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН У ВЕРТИКАЛЬНИХ ТА КРИВОЛІНІЙНИХ СВЕРДЛОВИНАХ**

*Горбунович І.В.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, [irina.gorbunovich@gmail.com](mailto:irina.gorbunovich@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-6859-0663](https://orcid.org/0000-0002-6859-0663)

*Левківська Л.В.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, [l\\_v\\_g@ukr.net](mailto:l_v_g@ukr.net), [orcid.org/0000-0002-5589-5257](https://orcid.org/0000-0002-5589-5257)

#### **Постановка проблемы.**

Практика современной экономики показывает, что наличие серьезных запасов углеводородных ресурсов при умелом использовании порой может компенсировать все недостатки даже самого отсталого и неконкурентоспособного государства. Украина еще в середине 1970-х годов прошлого века являлась флагманом советской сырьевой промышленности и была одним из крупнейших экспортёров газа в Европе. Естественно, объемы украинской газо- и нефтедобычи тех времён несравнимы с сегодняшними показателями крупнейших углеводородных мировых государств, однако для современной Украины 68,7 млрд куб. м. природного газа, добытых в 1975 году, и 14,5 млн т нефти – в 1972-м, до сих пор остаются неповторимыми рекордами [1].

В 2013 году наша страна сумела добыть всего 3 млн т нефти и 20,998 млрд куб. м. газа. В 2014 году она сократила добычу газа до 20,5 млрд куб. м., в 2015 году – до 19,896 млрд куб. м, и лишь в 2016 году ей удалось немного поднять эту цифру до 19,98 млрд куб. м. За первые 8 месяцев 2017 года добыча газа в Украине также увеличилась лишь на 3,1 % по сравнению с 2016 годом.

Ситуация по добыче нефти в Украине ещё плачевнее: в 2016 году Украина сократила добычу нефти на 11,6% по сравнению с 2015 годом — до 1,5 млн тонн, а уже в январе – феврале 2017 года эта добыча ещё сократилась на 4,4% по сравнению с аналогичным периодом 2016 года.

По темпам ежегодной добычи углеводородов Украина находится в мире на весьма посредственных позициях, занимая в сфере добычи газа и нефти 31-е и 51-е места соответственно.

Конечно, в этом плане наша страна опережает такие неоспоримо развитые государства, как Франция, Австрия или Италия, но все же от лидеров мирового рейтинга стран-производителей углеводородного сырья нас отделяет бездонная пропасть.

Ежегодно Украина потребляет не меньше 50 млрд куб. м газа и 10 млн т нефтепродуктов.

Вместо направления всех усилий только на поиски по всему миру альтернативных источников и продавцов газа нашей стране нужно срочно и кардинально наращивать собственную добычу. Ведь сейчас в Украине катастрофически упали объемы глубокого бурения и практически игнорируется практика восстановления недействующих и ликвидированных скважин. И это в стране, где по прогнозам запасы ресурсов газа на открытых месторождениях составляют около 4,5 триллиона кубометров при добыче за всю ее историю лишь около двух триллионов кубометров. Причем около

70% углеводородов на старых или так называемых истощенных украинских месторождениях, как отмечают специалисты, остаются в земле, что вдвое больше мировых показателей.

Только за счет реанимации ликвидированных скважин ежегодную добычу газа в стране можно поднять на пять-шесть миллиардов кубометров, а нефти — на полтора-два миллиона тонн. Если же и дальше импортировать газ, нефть и нефтепродукты в таком же объеме, как сейчас, то Украина скоро будет вынуждена платить за границу сумму в валюте, которая близка к размеру годового бюджета страны и эти деньги никогда не вернуться в Украину. А если заплатить такие деньги собственному нефте-газовому производителю, то почти 85% из них вернуться государству в виде зарплаты работникам, доходов от производства большого количества материалов, химреагентов и металла, необходимых для бурения новых скважин, а также в виде прямых налогов. Такое решение является очень мощным мультипликатором, способным в кратчайшее время обновить экономику страны и ускорить ее рост.

Принимая во внимание, что в связи с увеличением глубины и дальности проходки скважин их стоимость ныне превышает 70 млн. долларов США [2], а аварийной является каждая третья скважина, можно сделать вывод, насколько важной сегодня является проблема теоретического прогнозирования критических режимов функционирования бурильных колонн (БК) и какова цена ошибки таких прогнозов.

#### **Изложение основного материала.**

В соответствии с требованиями экономики, геологическими условиями залегания месторождения и технологическими возможностями нефтегазовых компаний в настоящее время бурят вертикальные, наклонно направленные, горизонтальные и многосторонние нефтяные и газовые скважины различной глубины [3]. Однако практическое внедрение технологии бурения более глубоких скважин различной пространственной ориентации связано с необходимостью теоретического моделирования механических явлений, протекающих в конструкциях бурильного оборудования, с целью предупреждения критических режимов их функционирования. При этом одним из наиболее важных аспектов данного направления является теоретическое моделирование квазистатического и динамического поведения колонн глубокого бурения. Эта задача, однако, существенно осложняется тем обстоятельством, что по условиям геометрического подобия бурильная колонна эквивалентна человеческому волосу, и в то же время при функционировании она подвержена действию большого числа различных факторов, усложняющих методики их теоретического моделирования

В подвешенном состоянии на бурильную колонну действуют распределенные силы тяжести. Они создают в ней растягивающую осевую силу, которая достигает максимума в точке подвеса и убывает до нуля на ее нижнем конце. В рабочем состоянии, когда колонна упирается нижним концом в дно скважины, на нее действует сжимающая сила вертикальной реакции, поэтому вся колонна находится в растянуто-сжатом напряженном состоянии.

Для придания колонне вращательного движения к ее верхнему концу прикладывается крутящий момент. Для неглубоких скважин можно считать, что в стационарном состоянии этот момент равен моменту резания, приложенному к долоту, и тогда крутящий момент в самой колонне остается постоянным по ее длине. Однако, если колонна глубокая, то для вычисления приводного крутящего момента в точке подвеса необходимо к моменту резания добавить распределенные моменты сил трения между стенками скважины и колоны. Тогда внутренний крутящий момент в колонне станет переменным. И он оказывается существенно переменным при продольных и крутящих колебаниях колонны, когда долото входит и выходит из контакта с породой на дне скважины, и процесс резания становится прерывистым.

Важным фактором, влияющим на квазистатическое и динамическое поведение бурильной колонны, является ее вращение. Для колонн с геометрическими несовершенствами и с дисбалансами масс оно приводит к появлению центробежных сил инерции, существенно влияющих на устойчивость прямолинейной формы БК. В случаях возбуждения изгибных колебаний, вращение является источником возникновения гироскопических (кориолисовых) сил инерции. Эти силы связывают различные виды движений (вращательные и линейные) и приводят к нарушению синфазности колебаний.

Очень сложные эффекты в бурильных колоннах порождаются внешними и внутренними потоками промывочной жидкости. Во-первых, с их движением связаны дополнительные силы трения, влияющие на динамику БК. Во-вторых, при изгибных колебаниях БК внутренние потоки (по аналогии с вращательным движением) также порождают центробежные и гироскопические силы

инерции, дестабилизирующие прямолинейную форму колонны и изменяющие спектр ее собственных изгибных колебаний.

Заметим, что на практике все перечисленные силы и воздействия могут иметь место одновременно с различными сочетаниями их интенсивностей и приводить, в зависимости от длины БК, к различным недопустимым режимам.

Поэтому при добыче топлив с больших глубин повышение эффективности бурения вертикальных скважин роторным способом тесно связано с проблемами выявления критических режимов функционирования бурильных колонн и с разработкой мер по снижению их отрицательного влияния на технологический процесс. К явлениям, негативно влияющим на технологический процесс, относятся:

- потеря устойчивости прямолинейной формы БК в нижней ее части по типу сжато-растянутого, изогнутого, закрученного стержня;
- возбуждение продольных колебаний БК под действием различных возмущений технологического характера;
- возбуждение резонансных изгибных колебаний БК, обусловленных геометрическими несовершенствами и дисбалансом всей системы и отдельных ее частей;
- параметрическое самовозбуждение крутильных колебаний БК, вызванных нелинейными силами трения срывного взаимодействия между режущим инструментом и обрабатываемой породой.

Указанные явления могут приводить к аварийным ситуациям, сопровождающимся обрывом трубы БК, прихватом режущего инструмента в зоне резания породы и затиранием участков БК в породе, развинчиванием труб БК, отклонением оси скважины от вертикали и ее незапланированным искривлением, а также потерей устойчивости стенок скважины и их обрушением.

Установление параметров процесса бурения, при которых реализуются критические состояния, может быть осуществлено методами математического моделирования. Однако попытки практического проведения математических экспериментов по прогнозированию критических состояний БК сопряжены со значительными вычислительными трудностями. В первую очередь они обусловлены особенностями соотношений между геометрическими параметрами БК.

Так, поскольку для длинной колонны ее диаметр составляет  $10^{-5}$  часть ее длины, она оказывается геометрически подобной человеческому волосу с ничтожно малыми изгибной и крутильной жесткостью. В связи с этим для их теоретического исследования часто применяют механические модели струн или абсолютно гибких нитей. В англоязычной литературе колонны так и называют: “drill string”- “бурильная струна”. В то же время, чтобы правильно описать краевые и локальные эффекты изгибного деформирования БК, надо рассчитывать их по теории балок, поэтому использование этой теории на длинах в несколько километров приводит к появлению так называемой “вычислительной жесткости”, сопровождаемой значительным ухудшением сходимости вычислительных алгоритмов. В математике уравнения, моделирующие эти эффекты, называются сингулярно возмущенными [4].

Второе осложнение задачи моделирования квазистатического и динамического поведения БК связано со сложной комбинацией сил и воздействий, влияющих на ее квазистатику и динамику. Поэтому рассматриваемые задачи являются многопараметрическими и в общей постановке – неразрешимы. В связи с этим одним из наиболее рациональных подходов к их решению является разделение изгибных, продольных и крутильных движений колонны, их раздельное рассмотрение и установление наиболее общих закономерностей протекающих процессов с установлением их критических состояний.

Уравнения изгибных колебаний обычно записывают во вращающейся вместе с колонной системе координат  $Oxyz$  [5]. Начало этой системы совпадает с точкой подвеса, ось  $Oz$  совпадает с продольной осью колонны. Уравнения динамического изгиба БК в плоскостях  $Oxz$  и  $Oyz$  можно представить в виде

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( M_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - (\rho F + \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}}) \omega^2 u - 2(\rho F + \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}}) \omega \frac{\partial v}{\partial t} + V^2 \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2V \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}} \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} + (\rho F + \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}}) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left( T \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( M_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - (\rho F + \rho_{жк} F_{жк}) \omega^2 v + 2(\rho F + \rho_{жк} F_{жк}) \omega \frac{\partial u}{\partial t} + V^2 \rho_{жк} F_{жк} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + 2V \rho_{жк} F_{жк} \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} + (\rho F + \rho_{жк} F_{жк}) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0.$$

Здесь  $u$ ,  $v$  – упругие перемещения элемента трубы вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  соответственно;  $EI$  – изгибная жесткость;  $T$  – внутренняя продольная сила;  $M_z$  – внутренний крутящий момент;  $\rho F$  – погонная плотность трубы;  $\rho_{жк} F_{жк}$  – погонная плотность жидкости;  $\omega$  – угловая скорость вращения БК;  $V$  – скорость движения промывочной жидкости;  $t$  – время.

В этих уравнениях первые слагаемые представляют обычные члены упругого изгиба балок теории Бернулли-Кирхгофа. Слагаемые, содержащие осевую силу  $T$ , определяют дестабилизирующий (при  $T < 0$ ) или стабилизирующий (при  $T > 0$ ) эффект в теории Эйлера устойчивости стержней. Особое влияние на бифуркационное выпучивание БК оказывает действие крутящего момента  $M_z$ , поскольку при его присутствии форма потери устойчивости становится пространственной (спиральной).

Влияние вращения на поведение БК определяется слагаемыми с множителем  $\omega$ . Из-за большой длины БК даже при малой угловой скорости генерируемые вращением центробежные и кориолисовы силы инерции часто являются основной причиной потери устойчивости и, как это бывает в гироскопических системах, исключают возможность колебаний БК по стационарным (синфазным) формам [6]. Эти эффекты довольно детально изучены в теории вращающихся валов. Однако в БК они реализуются в более сложных формах, поскольку происходят в комбинации с другими механическими явлениями.

Слагаемые в уравнениях (1), содержащие коэффициенты  $V^2$  и  $V$ , обусловлены дестабилизирующим влиянием движущихся в трубе масс промывочной жидкости. Учитывая, что промывочная жидкость имеет плотность, достигающую до  $2 \text{ г/см}^3$ , можно считать, что ее влияние на устойчивость и колебания БК является ощутимым.

Уравнения (1) могут быть использованы для исследования свободных колебаний БК и моделирования переходных режимов разгона и торможения ее вращения.

Если изъять из этих уравнений члены с производными по времени, то получим уравнения квазистатической устойчивости вращающейся БК, преднапряженной продольной силой и крутящим моментом.

С особенными техническими и теоретическими трудностями сопряжено и бурение криволинейных скважин, которые последнее время получают все большее распространение во всем мире, поскольку они пронизывают нефтеносные и газоносные слои вдоль их ламинированной структуры, и поэтому покрывают большие зоны отбора топлива. С применением криволинейных скважин уменьшается общее количество проходных колодцев и их дебит оказывается на порядок выше дебита вертикальных скважин.

Практическое внедрение технологии бурения криволинейных скважин связано с необходимостью теоретического моделирования механических явлений, которые происходят в конструкциях бурильного оборудования, с целью предупреждения критических и аварийных режимов их функционирования. При этом наибольший интерес вызывают вопросы определения контактных и фрикционных сил, а также сил сопротивления, действующих на БК в криволинейной скважине в процессе ее спуска, подъема и функционирования [7].

В строительной механике криволинейных стержней до сих пор не разработаны методы теоретического моделирования указанных явлений. Такое положение вопроса связано со значительной сложностью указанных процессов, вызванной большой длиной бурильных колонн и условиями их контактного взаимодействия со стенками криволинейных скважин.

В данной работе для теоретического моделирования упругого изгиба БК в криволинейной скважине используется классическая теория гибких криволинейных стержней, сформулированная в рамках гипотез Кирхгофа-Клебша. Квазистатическое равновесие колонны рассматривается в системе координат  $Oxuz$ . С осевой линией трубы колонны связана координатная линия  $s$ , на которой введено подвижную тройку векторов  $\vec{\tau}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{b}$ , где  $\vec{\tau}$  – орт касательной,  $\vec{n}$  – орт главной нормали,  $\vec{b}$  – орт бинормали.

Уравнения равновесия элемента трубы бурильной колонны в векторной форме имеют вид:

$$\tilde{d}\vec{F}/ds = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{F} - \vec{f}, \quad \tilde{d}\vec{M}/ds = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{M} - \vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}, \quad (2)$$

где  $\vec{F}$ ,  $\vec{M}$  - главный вектор и главный момент внутренних сил;  $\vec{f}$ ,  $\vec{m}$  - векторы интенсивности внешних распределенных сил и моментов, соответственно;  $\vec{\omega}_\chi$  - вектор Дарбу.

Проектируя левые и правые части соотношений (2) на оси  $u$ ,  $v$ ,  $w$  местной системы координат, получаем шесть скалярных уравнений равновесия

$$\begin{aligned} dF_u/ds &= -qF_w + rF_v - f_u, & dM_u/ds &= -qM_w + rM_v + F_v - m_u, \\ dF_v/ds &= -rF_u + pF_w - f_v, & dM_v/ds &= -rM_u + pM_w - F_u - m_v, \\ dF_w/ds &= -pF_v + qF_u - f_w, & dM_w/ds &= -pM_v + qM_u - m_w. \end{aligned} \quad (3)$$

Они называются уравнениями Кирхгофа.

Уравнения равновесия (3) содержат в общем случае девять неизвестных функций:  $F_u$ ,  $F_v$ ,  $F_w$ ,  $M_u$ ,  $M_v$ ,  $M_w$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $r$ . В связи с этим шесть построенных уравнений недостаточно для определения всех этих величин. Усилия  $F_u$ ,  $F_v$ ,  $F_w$  в рамках принятой гипотезы о нерастяжимости осевой линии стержня являются чисто статическими факторами и определяются из условий равновесия (3). Учитывая, что оси главного трехгранника ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) являются главными осями изгиба и кручения элемента стержня, то проекции главного момента внутренних сил можно представить в виде:

$$M_u = A(p - p_0), \quad M_v = B(q - q_0), \quad M_w = C(r - r_0), \quad (4)$$

где  $p$ ,  $q$ ,  $r$  - функции кривизны и кручения трубы колоны в деформированном состоянии;

$p_0$ ,  $q_0$ ,  $r_0$  - эти же функции в недеформированном состоянии;

$A$ ,  $B$ ,  $C$  - жесткости при изгибе и кручении.

Соотношения (4) позволяют исключить из уравнений равновесия моментов моменты  $M_u$ ,  $M_v$ ,  $M_w$  и свести их к виду

$$\begin{aligned} dp/ds &= (A dp_0/ds - Cqr + Cqr_0 + Brq - Brq_0 + F_v - m_u)/A, \\ dq/ds &= (B dq_0/ds - Arp + Arp_0 + Cpr - Cpr_0 - F_u - m_v)/B, \\ dr/ds &= (C dr_0/ds - Bpq + Bpq_0 + Aqp - Aqp_0 - m_w)/C. \end{aligned} \quad (5)$$

Замыкание системы разрешающих уравнений осуществляется с помощью дополнительных кинематических переменных, обусловленных направляющими косинусами ортов  $\vec{\tau}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{b}$ . Для их определения с помощью формул Френе получены соотношения

$$\frac{d\vec{\tau}}{ds} = \sqrt{p^2 + q^2} \vec{n}, \quad \frac{d\vec{n}}{ds} = -\sqrt{p^2 + q^2} \vec{\tau} + \left(r - \frac{d\chi}{ds}\right) \vec{b}, \quad \frac{d\vec{b}}{ds} = -\left(r - \frac{d\chi}{ds}\right) \vec{n}. \quad (6)$$

Уравнения (3), (5), (6) дополняются геометрическими равенствами

$$dx/ds = \tau_x, \quad dy/ds = \tau_y, \quad dz/ds = \tau_z, \quad (7)$$

которые вместе с первыми геометрическими интегралами составляют полную систему уравнений теории гибких пространственно искривленных стержней.

Построенная система уравнений (3), (5), (6), (7) теории гибких криволинейных стержней описывает напряженно-деформированное состояние тонкого упругого стержня произвольной геометрии под действием заданной нагрузки при заданных граничных условиях. Однако она не может быть непосредственно использована для анализа механики буровой колонны в криволинейной скважине в силу определенной специфики ее упругого изгиба. Дело в том, что в отличии от традиционной постановки задачи для системы (3), (5), (6), (7), в которой 15 зависимых

переменных  $F_u, F_v, F_w, p, q, r, \tau_x, \tau_y, \tau_z, n_x, n_y, n_z, x, y, z$  считаются искомыми, а внешние воздействия  $f_u, f_v, f_w$ , - заданы, в случае анализа изгибания колонны в криволинейной скважине часть зависимых переменных  $x(s), y(s), z(s)$  уже известны, но некоторые внешние и внутренние силы, под действием которых это изгибание осуществляется и вызванные контактным взаимодействием между трубой колонны и стенками скважины, становятся неизвестными и подлежат определению. Чтобы решить изменённую таким образом проблему, необходимо для одной части зависимых переменных ставить так называемые прямые задачи, а для другой – обратные задачи механики изгибания буровых колон в криволинейных скважинах [8].

Разработанная методика вычисления внутренних и внешних сил, действующих на буровую колонну, позволяет с высокой точностью определять эти величины в скважинах практически любой конфигурации с учётом геометрических несовершенств БК и локальных отклонений осевой линии скважины от заданной, что даёт возможность своевременно определять критические режимы функционирования буровых колон.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Бурлака Г.Г. Стратегія нафтопродуктозабезпечення як складова енергобезпеки України / Г.Г. Бурлака // Актуальні проблеми економіки. – 2009. – №9. – С.43-49.
2. Iyoho A.W. Lessons from integrated analysis og GOM drilling performance / A.W. Iyoho, R.A. Meize, K.K. Millheim, M.J. Crumrine // SPE Drilling & Completion. – March 2005. – P. 6-16.
3. Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин. – Вертикальне та скероване буріння. Т.3 – Київ.: Інтерпрес ЛТД. – 2004. – 294с.
4. Чанг К. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи / К. Чанг, Ф. Хауэс – М., Мир. – 1988. – 247 с.
5. Гуляев В.І. Вільні коливання бурових колон, що обертаються / В.І. Гуляев, П.З. Луговий, І.В. Горбунович // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – №3. – С.64-70.
6. Gulyayev V.I. The buckling of elongated rotating drill strings/ V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, I.L. Solovjov, I.V. Gorbunovich // J. Petr. Sci. Eng. 2009. No 67. – P. 140 – 148.
7. Гуляев В.І. Мінімізація сил опору при осьовому русі бурової колони у криволінійній свердловині / В.І. Гуляев, О.М. Андрусенко, Л.В. Левківська // Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". Науково-технічний збірник. Випуск 1 (31), 2015. – С. 145 – 152.
8. Гайдайчук В.В. Математичне моделювання пружного згинання бурової колони у каналі криволінійної нафто - газової свердловини / В.В. Гайдайчук, Л.В. Левківська, Я.І. Ковальчик // Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. – Вип. 97. – К: КНУБА, 2016. – С. 43 –58.

### REFERENCES

1. Burlaka H.H.(2009). Stratehia naftoproduktozabezpechennia yak skladova enerhobezpeky Ukrainy. [Strategy of oil and gas products supply as component of energy security of Ukraine]. Aktualni problemy ekonomiky - Current issues of economics, 9, 43-49 [in Ukrainian].
2. Iyoho A.W., Meize R.A., Millheim K.K., Crumrine M.J. (2005). Lessons from integrated analysis og GOM drilling performance // SPE Drilling & Completion. – P. 6-16.
3. Musliuk M.A., Rybchych I.Y.,Yaremiichuk R.S. (2004). Burinnia sverdlovyn. – Vertykalne ta skerovane burinnia [Vertical and control drilling]. (Vol 3). Kyiv: Interpres LTD [in Ukrainian].
4. Chang K., Haues F. (1988). Neliniyni synguliarno zbureni kraievi zadachi. [Non-linear singular perturbation boundary problems]. M, Mir. -247 c. [in Russian]
5. Gulyayev V.I., Lugovy P.Z., Gorbunovich I.V. (2007). Vilni kolyvannia burylnyh kolon scho obertaiutsia. [Free vibrations of rotating drill columns]. Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy - Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3, 64-70 [in Ukrainian]
6. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. (2009). The buckling of elongated rotating drill strings. J. Petr. Sci. Eng. No 67. – P. 140 – 148.
7. Gulyayev V.I., Andrusenko O.M., Levkivska L.V. (2015). Minimizatsia syl oporu pry osovomu rusi burylnoi kolony u kryvoliniinii sverdlovyni [Minimization of resistance forces in axial motion of a drill string in a curve bore-hole] Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universytetu. Seria "Tehnichni nauky". Naukovo – tekhnichniy zbirnyk – Visnyk National Transport University. Series "Technical sciences". Scientific and Technical Collection. Issue 1 (31), 145 - 152 [in Ukrainian].
8. Gaidaichuk V.V., Levkivska L.V., Kovalchik Y. I. (2016). Matematychnе modeliuвання pruzhnoho zhyvannia burylnoi kolony u kanali kryvoliniinoi nafto-hazovoi sverdlovyny [Mathematical

modeling of the drill string bending elastic channel curvilinear oil and gas boreholes] Opir materialiv i teoria sporud - Strength of Materials and Theory of Structures. Issue 97, 43 - 58 [in Ukrainian].

#### РЕФЕРАТ

Горбунович І.В. Вивчення проблеми виявлення критичних режимів функціонування бурильних колон у вертикальних та криволінійних свердловинах / І.В. Горбунович, Л.В. Левківська // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2018. – Вип. 1 (40).

У статті аналізуються явища, що негативно впливають на технологічний процес буріння нафто-газових свердловин. Розглядаються питання теоретичного моделювання механічних явищ, які виникають у конструкціях бурильного обладнання, для попередження критичних й аварійних режимів їх функціонування.

Об'єкт дослідження – бурильна колона у вертикальній або криволінійній свердловині.

Мета роботи полягає в створенні оптимальної методики виявлення критичних режимів функціонування бурильних колон у вертикальних і криволінійних свердловинах.

Методи дослідження – теоретичні методи дослідження: теорія гнучких криволінійних стрижнів, метод зведення прямих задач для звичайних диференціальних рівнянь до обернених задач і метод Рунге-Кутти.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** БУРИЛЬНА КОЛОНА, ВЕРТИКАЛЬНА СВЕРДЛОВИНА, КРИВОЛІНІЙНА СВЕРДЛОВИНА, АВАРІЙНА СИТУАЦІЯ, СТІЙКІСТЬ, ВНУТРІШНІ ТА ЗОВНІШНІ СИЛИ.

#### ABSTRACT

Gorbunovich I.V., Levkivska L.V. A study of the problem of identifying critical states of drill string in vertical and curvilinear boreholes. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2018. – Issue 1 (40).

The paper considers negative aspects influencing the technological process of drilling of oil and gas wells. The problems of theoretical modeling of mechanical phenomena that occur in the constructions of drilling equipment are discussed in order to prevent critical states of their functioning.

Object of the study is a drill string in vertical and curvilinear borehole.

The purpose of the study is to create an optimal methodology to identify critical operating conditions of drill columns within vertical and curved boreholes.

Method of study is based on the theory of flexible curvilinear strings along with the approach of reducing direct problems for ordinary differential equations to inverse problems. The Runge-Kutty method is used for numerical analysis.

**KEY WORDS:** DRILL STRINGS, VERTICAL BORE-HOLE, CURVILINEAR BORE-HOLE, EMERGENCY SITUATION. STABILITY, INTERNAL AND EXTERNAL FORCES.

#### РЕФЕРАТ

Горбунович И.В. Изучение проблемы выявления критических режимов функционирования бурильных колонн в вертикальных и криволинейных скважинах / И.В. Горбунович, Л.В. Левковская // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2018. – Вып. 1 (40).

В статье анализируются явления, негативно влияющие на технологический процесс бурения нефте-газовых скважин. Обсуждаются вопросы теоретического моделирования механических явлений, которые происходят в конструкциях бурильного оборудования, с целью предупреждения критических и аварийных режимов их функционирования.

Объект исследования – бурильная колонна в полости вертикальной либо криволинейной скважины.

Цель работы заключается в создании оптимальной методики выявления критических режимов функционирования бурильных колонн в вертикальных и криволинейных скважинах.

Методы исследования – теоретические методы исследования, такие как теория гибких криволинейных стержней, метод приведения прямых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений к обратным задачам и метод Рунге-Кутты.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, ВЕРТИКАЛЬНАЯ СКВАЖИНА, КРИВОЛИНЕЙНАЯ СКВАЖИНА, АВАРІЙНАЯ СИТУАЦІЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ВНУТРЕННИЕ И ВНЕШНИЕ СИЛЫ.

**АВТОРИ:**

Горбунович Ірина Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, тел. +380676001177, Україна, 04128, м. Київ, вул Туполева, буд. 9А, кв.27, orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Левківська Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: l\_v\_g@ukr.net, тел. +380975475724, Україна, 01103, м. Київ, вул. Бойчука, буд. 42, к. 514, orcid.org/0000-0002-5589-5257.

**AUTHORS:**

Gorbunovich Irina Valentynivna, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, tel. +380676001177, Ukraine, 04128, Kyiv, Tupolieva str., 9A, ap. 27, orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Levkivska Liydmyla Volodymyrivna, Ph.D., National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: l\_v\_g@ukr.net, тел. +380975475724, Ukraine, 01103, Kyiv, Boychuka str., 42, of. 514, orcid.org/0000-0002-5589-5257.

**АВТОРЫ:**

Горбунович Ирина Валентиновна, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: irina.gorbunovich@gmail.com, тел. +380676001177, Украина, 04128, г. Киев, ул Туполева, д. 9А, кв.27, orcid.org/0000-0002-6859-0663.

Левковская Людмила Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: l\_v\_g@ukr.net, тел. +380975475724, Украина, 01103, г. Киев, ул. Бойчука, д. 42, к. 514, orcid.org/0000-0002-5589-5257.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна

**REVIEWER:**

Gaidaichuk V.V., Engineering (Dr.), Professor, Kiev National University of Construction and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kiev, Ukraine

Loza I.A., Physics and Mathematics (Dr.), Professor, National Transport University, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kiev, Ukraine