

## УДОСКОНАЛЕНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ І ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЇ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ З ВРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Чудик І.І., Токарук В.В., Щуцький В.І.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновано вдосконалений підхід для проектування і вибору конструкції бурильної колони з врахуванням енергетичних затрат і її вартості. Енергетичні затрати при цьому розраховуються для умов обертання бурильної колони в стовбурі свердловини і забезпечення нею процесу промивання гірничої виробки. При цьому враховано показники еквівалентних, осьових, згинальних, крутильних напружень, текучості матеріалу труб, силових і геометричних факторів системи, процесів тертя металу до гірської породи, обертання труб у свердловині. Це вкладено в розроблену авторами програму DrillStr в системі програмування Delphi 7. Приведено алгоритм обчислення і послідовність вибору енергоефективної бурильної колони при певній множині альтернатив.

**Ключові слова:** бурильна колона, статична міцність, витривалість, енергоефективність, буріння.

**Постановка проблеми.** Нафтогазова енергетика займає в економіці України визначальну позицію та великою мірою впливає на її економічний і соціальний розвиток. В енергетичному балансі нашої держави близько 60% займає нафта і газ. Для порівняння і прикладу: у 2016 році в Україні видобуток газу становив близько 14,5 млрд. м<sup>3</sup>. Проте, річні потреби економіки держави є значно більшим при наявній ресурсній базі, яка є достатньою для покриття попиту. Основними проблемами цього дисбалансу є низька продуктивність бурових робіт, починаючи з етапу пошуків вуглеводнів і закінчуючи їх видобутком. Тому нагальною потребою сьогодні є необхідність розширення фронту розвідувального і експлуатаційного буріння. Це дозволить отримати нарощування видобутків вуглеводнів та збільшення коефіцієнту їх вилучення за допомогою фонду нових і відновлених свердловин. Для реалізації цієї проблеми необхідно умовою є вдосконалення техніко-технологічного забезпечення процесу спорудження нафтогазових свердловин і доведення його до енергоефективного і високопродуктивного за рахунок прийняття і впровадження науково-технічних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У реалізації проектів будівництва, ремонту та відновлення свердловин незалежно від їх глибини, способу буріння, техніко-технологічних параметрів, більшість функцій виконує бурильна колона (БК). Її проектування і вибір описаний в методиках, запропонованих Булатовим А. І., Султановим Б. З., Калініним А. Г., Сарояном А. Е., в основу яких закладено дотримання вибраними конструкціями умов статичної міцності і витривалості [1-6].

Бурильна колона є складною механічною системою із послідовним з'єднанням великої кількості однотипних елементів. Основна її відмінність від інших конструкцій полягає в тому, що при значній величині відношення довжини до діаметра колони внаслідок втрати стійкості вона обертається в свердловині, втрапивши прямолінійну форму рівноваги. Відомо, що стовбур гірничої виробки має складну просторову конфігурацію, утворену ділянками різної інтенсивності викривлення, довжинами, формами і розмірами поперечного перерізу [1-4].

**Виділення невирішених частин загальної проблеми.** Незважаючи на велику кількість

методик проектування і вибору БК для буріння свердловин, у жодній з них не враховуються вартість бурильних труб (БТ) і енергозатрати на їх роботу, що є важливими параметрами особливо сьогодні, коли вартість елементів БК і енергоносіїв, які використовуються під час буріння, зросли в сотні разів порівняно із роками створення базових наукових основ [1-5]. На основі цього виникає необхідність створення і реалізації нового підходу до проектування і вибору конструкції БК із врахуванням загальноприйнятих показників статичної міцності та витривалості, а також енергоефективності й мінімальної вартості трубної конструкції. При цьому визначальними параметрами є [7, 8]:

1. Взаємодія БК зі стінками свердловини та буровим розчином (БР).

2. Характер обертання БК у стовбурі свердловини під дією стискаючих, розтягуючих зусиль та інших навантажень.

3. Гідравлічна складова навантажень від дії БР.

**Мета статті.** Опираючись на вищевказане, основною метою наукової публікації є розроблення удосконаленого підходу до проектування і вибору конструкції БК із врахуванням енергоефективності. Для вирішення окресленої мети ставляться наступні **задачі дослідження**:

– формування математичного апарату для розрахунку статичної міцності, витривалості та енергоефективності БК;

– формування аналітичної моделі та принципів методики проектування і вибору конструкції БК із врахуванням енергоефективності;

– розроблення комп'ютерної програми DrillStr в Delphi 7 для проектування і вибору конструкції БК за багатокритеріальним підходом.

**Викладення основного матеріалу.** Найбільш складні умови роботи БК у стовбурі свердловини є характерними для обертального способу буріння (роторного чи з використанням системи верхнього приводу). При цьому для проектування і вибору конструкції БК першочергово розглядається умова її статичної міцності, яка в загальному випадку описується в роботі [5] та характеризується принципом рівності:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_{oc} + \sigma_{zc})^2 + 3\tau_{кр}^2} \leq \frac{\sigma_T}{n}, \quad (1)$$

де  $\sigma_e$ ,  $\sigma_{oc}$ ,  $\sigma_{zc}$ ,  $\tau_{кр}$  – еквівалентні, осьові, згинальні та крутильні напруження, які виникають

в БК;  $\sigma_T$  – границя текучості БТ;  $n$  – коефіцієнт запасу міцності БК.

Для БТ  $\sigma_T$  є лімітованою величиною, а  $\sigma_{oc}$  – визначаються:

$$\sigma_{oc} = \frac{[G_{i-1} + l_i q_i] \cdot \left(1 - \frac{\rho_{bp}}{\rho_m}\right) + G_\Gamma}{F_i}, \quad (2)$$

де  $G_{i-1}$  – сумарна вага секцій БК, розташованих нижче проекрованої;  $l_i, q_i, F_i$  – відповідно довжина, вага погонного метра та площа поперечного перерізу БТ, що розраховується;  $\rho_{bp}$  і  $\rho_m$  – густина БТ і БТ;  $G_\Gamma$  – навантаження, яке створюється на БК внаслідок перепаду тиску:

$$G_\Gamma = \frac{\pi}{4} (\Delta p_D + \Delta p_{OBT}) d_s^2, \quad (3)$$

де  $\Delta p_D, \Delta p_{OBT}$  – перепад тиску в долоті і об'єднаних бурильних трубах (ОБТ);

$d_s$  – найменший внутрішній діаметр ОБТ.

$$\sigma_{3z} = \frac{\pi^2 E I f}{L^2 W_{3z}}, \quad (4)$$

де  $f, L$  – стріла прогину і довжина півхвилі згину БК;  $E$  – модуль Юнга;  $I, W_{3z}$  – моменти інерції і опору при згині БК.

$$\tau_{kp} = \frac{M_{kp_{i-1}} + M_{kp_i}}{W_{kp_i}}, \quad (5)$$

де  $M_{kp_{i-1}}$  – крутний момент, що передається нижче розташованій секції БК;  $W_{kp_i}$  – момент опору на крученні БК.

$$M_{kp_i} = M_{kp_{i-1}} + M_{bp_i} + M_{mer_i}, \quad (6)$$

де  $M_{bp_i}$  – момент опору у процесі обертання БК у середовищі БР, [6-8];  $M_{mer_i}$  – момент опору, обумовлений тертям БК об стінку свердловини та адгезійною взаємодією труб із фільтраційною кіркою [6-8].

Розрахунок БК на витривалість полягає у визначенні узагальненого коефіцієнта запасу міцності із врахуванням осьових, дотичних, згинаючих та знакозмінних напружень у перерізах над долотом, між першою та другою ОБТ, у місцях переходу від однієї секції ОБТ до іншої, у місці переходу від ОБТ до БТ, між першою та другою БТ над ОБТ, в усіх інших переходах на іншу групу міцності, діаметри, товщини стінок, відповідно до [1-4]. За розрахункові перерізи приймають: для ОБТ і БТ із нагвинченими замками – основну площину замкової різьби для ОБТ і трубною різьби для БТ; для БТ із приварними з'єднуючими кінцями – переріз по тілу труби.

Узагальнений коефіцієнт запасу міцності БК на витривалість:

$$n = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}, \quad (7)$$

де  $n$  – фактичний узагальнений коефіцієнт запасу міцності на витривалість;  $n_\sigma$  і  $n_\tau$  – запаси міцності за нормальними напруженнями та дотичними напруженнями.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_\epsilon \cdot \sigma_{-1}}{\sigma_\epsilon \cdot \sigma_{3z} + \sigma_{oc} \cdot \sigma_{-1}}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{-1}$  – границя витривалості при симетричному циклі навантажень;  $\sigma_\epsilon$  – границя міцності матеріалу БТ.

$$n_\tau = \frac{\tau_T}{\tau_{kp}}, \quad (9)$$

де  $\tau_T$  – границя витривалості БК при крученні:

$$\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

У процесі поглиблення вибою свердловини на БК діють осьові радіальні сили, згинні та крутний моменти, коливання і вібрації, зовнішні й внутрішні тиски, які впливають як на її стійкість, так і на експлуатаційні енергозатрати, які на основі [8] описуються рівністю:

$$U = \sum_{i=1}^6 A_i \rightarrow \min \quad (11)$$

де  $A_1$  і  $A_2$  – робота розтягуючої (стискаючої) осьової сили і сили власної ваги;  $A_3$  – робота відцентрової сили;  $A_4$  – робота інерційної сили, обумовленої рухом БР;  $A_5$  – робота сили тиску pompування бурового насоса;  $A_6$  – робота крутного моменту.

На основі [8], для визначення параметрів  $A_i$  (для кожної окремої півхвилі згину БК, довжиною  $L_i$ ) використовують наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} U_i - A_{1i} - A_{2i} - A_{3i} - A_{4i} - A_{5i} - A_{6i} = 0 \\ U_i = \frac{EI_i f^2 \pi^4}{4L_i^3} \\ A_{1i} = \pm \frac{G^2 f^2 \pi^2}{4L_i} \\ A_{2i} = \pm \frac{q_i}{8} \cos(\alpha) f^2 \pi^2 \\ A_{3i} = \frac{q_i}{4 \cdot g} \omega^2 f^2 L_i \\ A_{4i} = \frac{\rho_{bp} f^2 \pi^2}{4L_i} (S_\epsilon g_\epsilon^2 + S_{kn} g_{kn}^2) \\ A_{5i} = \left[ S_0 P_0 + \begin{pmatrix} \left[ \rho_{bp} + \frac{P_{kp}}{Lg} \right] S_{kn} - \\ - \left[ \rho_{bp} - \frac{P_{om}}{Lg} \right] S_\epsilon \end{pmatrix} L_i g \right] \frac{f^2 \pi^2}{4L_i} \\ A_{6i} = \frac{2M_{kp_i}^2 \pi^2 f^2}{EI_i L_i} \end{cases}, \quad (12)$$

де  $i$  – порядковий номер півхвилі згину БК;  $\alpha$  – зенітний кут свердловини в інтервалі розташування БК;  $S_\epsilon$  і  $S_{kn}$  – площі поперечних перерізів внутрішнього каналу БК і кільцевого простору за ними;  $g_\epsilon$  і  $g_{kn}$  – швидкості потоку БР у перерізах з площами  $S_\epsilon$  і  $S_{kn}$ ;  $P_{BT}, P_{KP}, P_0$  – втрати тиску в БТ, у кільцевому просторі та насадках долота;  $S_0$  – площа поперечного перерізу промивальних отворів долота;  $\omega$  – кутова швидкість обертання БК у стовбурі свердловини;  $G$  – осьове навантаження на БК.

Реалізація даної задачі вибору раціональної конструкції БК проводиться з урахуванням багатокритеріальних оцінок та відповідних альтернатив. Елементами множини альтернатив у даній задачі є три типи конструкції БК, кожен з яких підходить для буріння даної свердловини: 1-й тип – товщина стінки БТ і група міцності змінюються почергово; 2-й – однакова група міцності сталі при однаковій товщині стінки по всій довжині БК; 3-й – змінюється група міцності сталі при однаковій товщині стінки.

Кожна з конструкцій буде оцінюватись за 4-а або 5-а (у випадку наявності інформації про вартість БТ) критеріями енергоефективності, до яких відносяться: мінімальна вага БК у повітрі; мінімальна робоча потужність приводу бурового насоса для забезпечення промивання свердловини; мінімальна робоча потужність обертача БК; максимальні коефіцієнти витривалості в небезпечних січеннях БК; мінімальна вартість БК.

Для проектування і вибору енергоефективної БК використовується програма DrillStr, яка розроблена в Delphi 7. У стартовому робочому вікні цієї програми вводиться вихідна інформація для реалізації розрахунку (рис. 1). У полі режимних

параметрів вводиться: навантаження на долото; швидкість обертання долота; продуктивність бурового насоса.

У полі даних про конструкцію свердловини вводиться: діаметр долота для буріння даного інтервалу; коефіцієнт кавернозності; глибина свердловини; глибина спуску попередньої обсадної колони; внутрішній діаметр попередньої обсадної колони; зенітний кут свердловини.

Наступний розділ стартового вікна програми – це інформація про бурові промивальні рідини. При цьому за введеною густиною БР та емпіричними формулами (залежно від моделі рідини) відповідно до [2, 4], розраховуються її реологічні параметри.

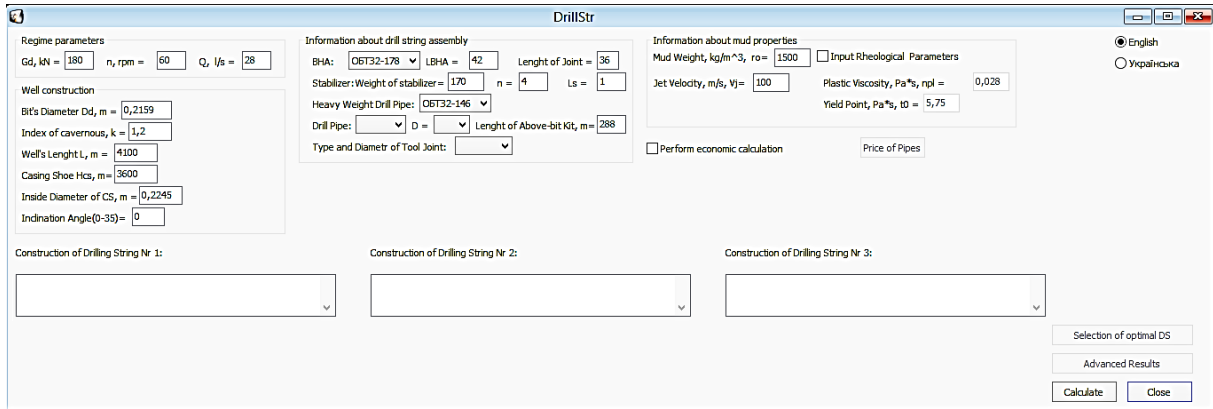


Рис. 1. Вікно програми DrillStr до введення даних

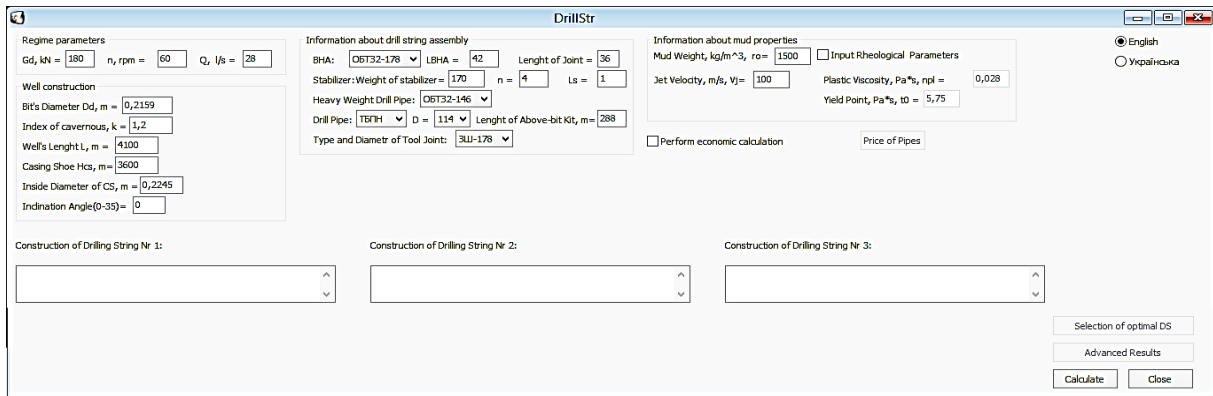


Рис. 2. Вікно програми DrillStr після введення вихідних даних

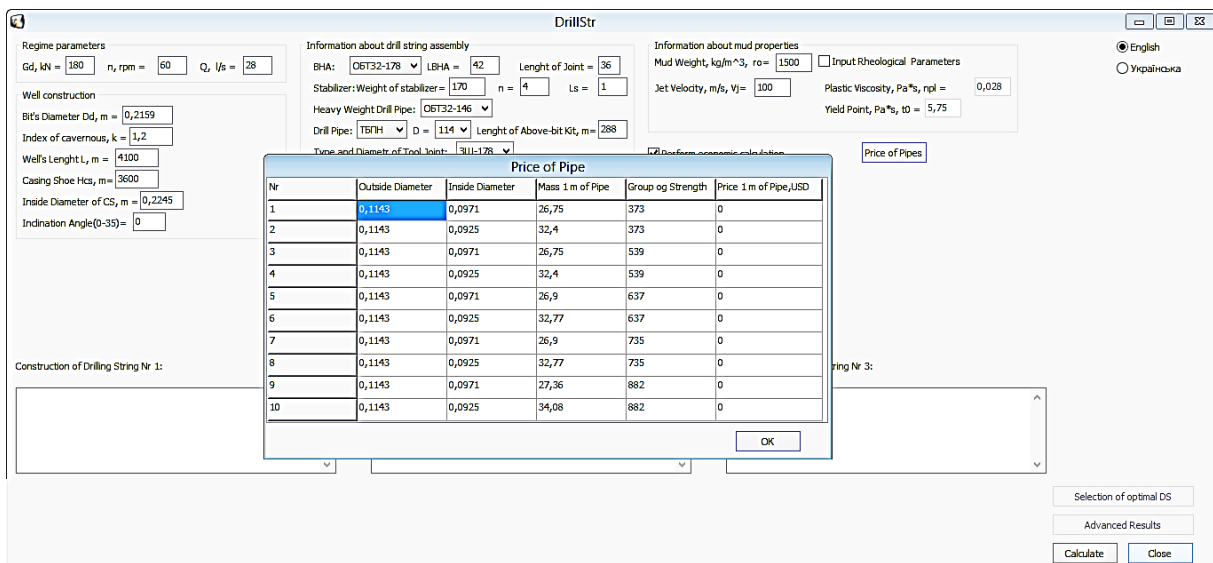


Рис. 3. Вікно програми DrillStr для введення цін труб

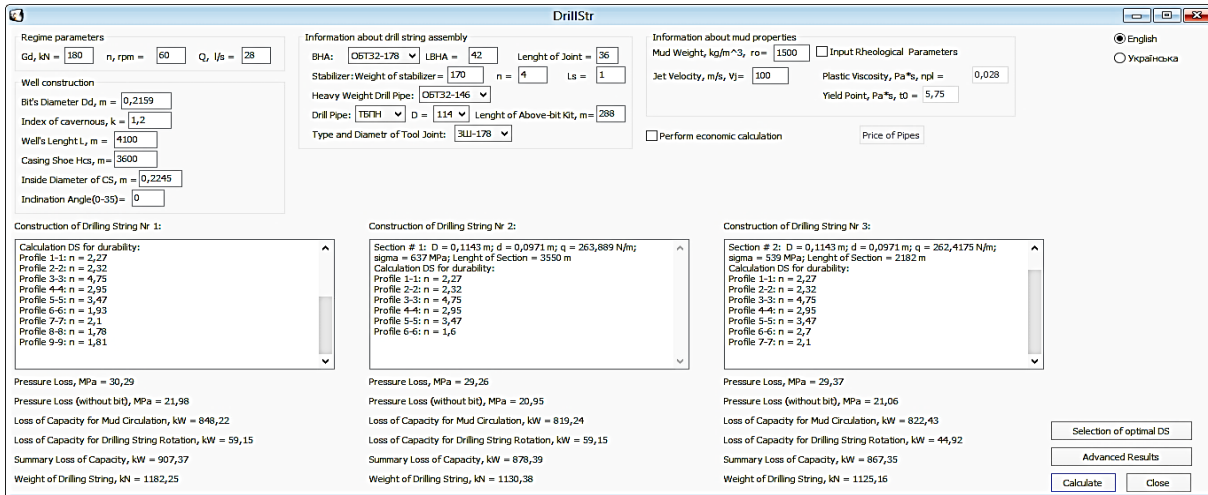


Рис. 4. Вікно програми DrillStr з результатом проектування БК

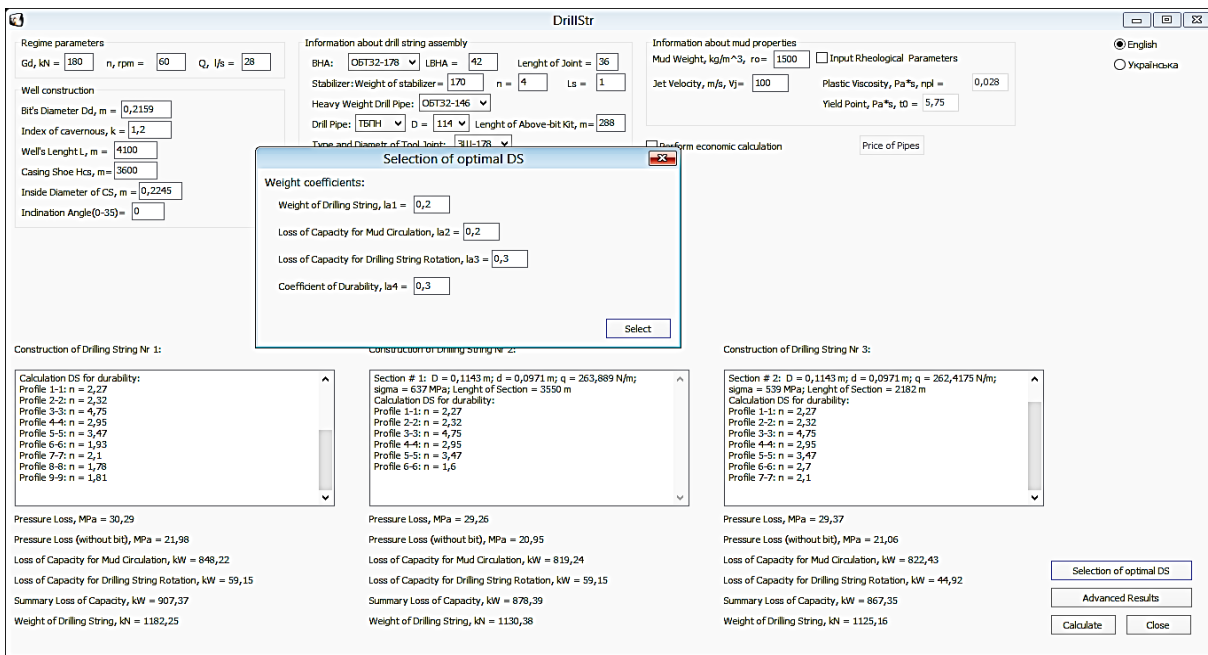


Рис. 6. Повідомлення результату вибору оптимальної конструкції БК

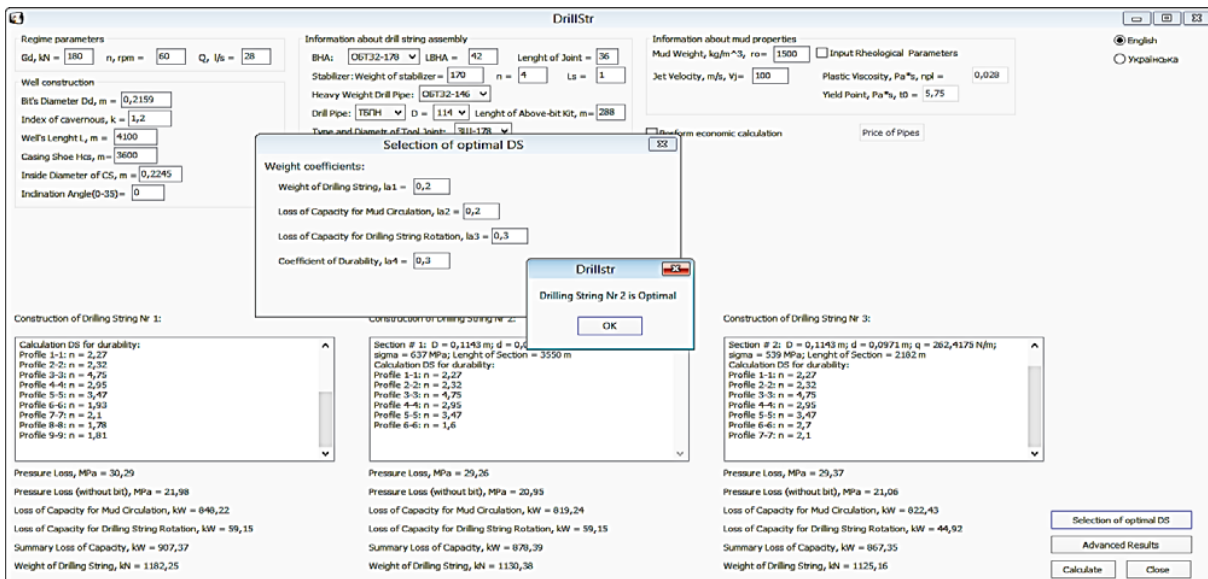


Рис. 5. Вікно програми DrillStr для введення вагових коефіцієнтів БК

У вікні інформації про компоновку БК необхідно ввести наступні дані: тип і діаметр ОБТ, які входять у склад компоновки; довжина компоновки; довжина свічки БК; кількість, довжина і вага стабілізаторів; тип і діаметр ОБТ; тип і діаметр бурильних труб; довжина наддолотного комплексу; тип замків бурильних труб. Після введення всіх вихідних даних стартове вікно програми набуває вигляду, рис. 2.

При наявності даних про вартість одного метра бурильних труб проводиться економічний розрахунок БК, активувавши відповідний пункт програми, рис. 3.

Після введення всіх необхідних даних кнопкою «Calculate» розпочинається проектування БК, при цьому виводиться низка варіантів конструкцій із супутніми відомостями про їх вагу, витрати енергії коефіцієнти витривалості, рис. 4.

Кнопкою «Advanced results» у графічній формі генеруються результати проектування з виведенням інформації з вартості та ваги БК; максимальних і мінімальних значення коефіцієнтів витривалості; втратах тиску в циркуляційній системі, залежно від продуктивності насоса.

Вибір оптимальної конструкції БК, із запроєктованих варіантів, розпочинається кнопкою «Selection of Optimal DS», рис. 5.

Після цього з'явиться вікно, в якому залежно від кількості критеріїв, буде оцінюватись енерго-

ефективність кожної з конструкцій. Завершення розрахунку і виведення на екран номера оптимальної конструкції БК проводиться кнопкою «Select», рис. 6.

**Висновки.** Представлено новий, відмінний від існуючих, підхід до проектування і вибору конструкції БК із врахуванням її міцнісних характеристик, енергетичних та матеріальних затрат. Останні ж при цьому визначаються умовами обертання БК із одночасним промиванням свердловини. Оптимальна конструкція БК вибирається при цьому з врахуванням певної множини критеріїв, якими в даному випадку є: мінімальна вага БК; мінімальна робоча потужність приводу бурового насоса для забезпечення промивання свердловини та ротора – для обертання БК; максимальні коефіцієнти витривалості та мінімальна вартість БК; максимальна ефективність спорудження свердловини.

Для чіткої і оперативної реалізації нового підходу до проектування і вибору БК розроблено комп'ютерну програму DrillStr в Delphi 7 з можливістю виконання окремих розрахунків конструкції БК: на статичну міцність, витривалість, енергоефективність. З їх урахуванням розрахована система дозволяє вийти на результат отримання оптимальної конструкції БК ґрунтуючись на наукових основах відомих вчених і результатах досліджень авторів даної публікації.

## Список літератури:

1. Александров М. Силы сопротивления при движении труб в скважине [Текст] / М. М. Александров // – М.: Недра, 1978. – 207 с.
2. Дейли И. Измерение сил, действующих на колонну бурильных труб и ее элементов движения в процессе бурения [Текст] / Дейли, Дейринг, Пафф, Ортлофф, Линн // Тр. АОИМ. Конструирование и технология машиностроения. – 1968. – № 2. – С. 24-34.
3. Янтурин А. Исследование деформации бурильной колонны в процессе бурения [Текст] / А. Ш. Янтурин: – автореф. дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 1975. – 26 с.
4. Подавалов Ю. Исследование распределения крутящего момента по длине сжатой части бурильной колонны при роторном бурении [Текст] / Ю. А. Подавалов // Труды ВНИИТнефть. – 1978. Вып. 10. – Куйбышев. – С. 57-62.
5. Султанов Б. Работа бурильной колонны в скважине [Текст] / [Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгузин, М. Х. Шаммасов, В. Н. Сорокин] // – М.: Недра, 1973. – 217 с.
6. Чудик І. І. Дослідження впливу деяких техніко-технологічних чинників на холосте обертання БК [Текст] / І. І. Чудик // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2008. – № 2(18). – С. 76-80.
7. Чудик І. І. Методика розрахунку енергії деформації та обертання БК у вертикальному стовбурі свердловини [Текст] / І. І. Чудик, В. В. Гриців // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 2(7). – С. 60-64.
8. Чудик І. І. До питання визначення потужності окремих видів обертання БК в стовбурі свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 3(8). – С. 15-18.

**Чудык И.И., Токарук В.В., Щуцкий В.И.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

### Аннотация

Предложен усовершенствованный подход для проектирования и выбора конструкции бурильной колонны с учетом энергетических затрат и ее стоимости. Энергетические затраты при этом рассчитываются для условий вращения бурильной колонны в стволе скважины и обеспечения ею процесса промывки горной выработки. При этом учтены показатели эквивалентных, осевых, изгибных, крутильных напряжений, текучести материала труб, силовых и геометрических факторов системы, процессов трения металла в горной породе, вращения труб в скважине. Это вложено в разработанную авторами программу DrillStr в системе программирования Delphi 7. Приведены алгоритм вычисления и последовательность выбора энергоэффективной бурильной колонны при определенной множестве альтернатив.

**Ключевые слова:** бурильная колонна, статическая прочность, выносливость, энергоэффективность, бурения.

**Chudyk I.I., Tokaruk V.V., Shchutskyi V.I.**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## **IMPROVED APPROACH TO THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF CHOICE DRILL STRING TAKING INTO ACCOUNT ENERGY**

### **Summary**

An improved approach to the design and selection of the drill string, taking into account energy costs. Energy costs thus calculated for the conditions of rotation of the drill string in the borehole and ensure circulations in well. Takes into account indicators of equivalent, axial, bending, torsional stress, the yield point of materials, strength and geometrical factors of system, friction of metal to rock, rotating drill string in well. It is displays in a program DrillStr developed by the authors at development environment Delphi 7. Shown algorithm of calculation and selection of energy efficient drill string at a some set of alternatives.

**Keywords:** drill column, static strength, endurance, energy, drilling.