

Presents the results of theoretical studies of the dependence of the pressure losses in the drill pipe with different wall thickness to determine the capabilities of the existing drilling equipment.

Key words: *the thickness of drill pipe, head loss, the flushing fluid, the parameters of drilling mode.*

Література

1. Залежність між теоретичною масою метра труби та товщиною стінки / А. О. Кожевников, Ю. Л. Кузін, О. А. Лексиков // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. – 2004. – Вип.72. – С.102–107.
2. Залежності геометричних характеристик бурильної труби від товщини стінки / С. В. Гошовський, А. О. Кожевников, Ю. Л. Кузін та ін.// Наук. Вісн. НГУ. – 2004. – № 4. С. 58–62.
3. Ганджумян Р. А. Практические расчёты в разведочном бурении.– М.: Недра – 1986. –253 с.

Поступила 16.06.15

УДК 622.24.051

М. В. Супрун; В. І. Куш, д-р фіз.-мат. наук, **А. П. Загора, Р. К. Богданов**, кандидати технічних наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ ТА ФОРМОЗМІНИ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ БУРОВОЇ КОРОНКИ

Запропоновано модель зношування робочої поверхні бурової коронки, що базується на чисельному аналізі модельної контактної крайової задачі механіки деформованого твердого тіла і забезпечує облік не тільки кінематики процесу буріння, а й специфіки контактної взаємодії інструменту і породи.

Ключові слова: *імпрегнована коронка, модель зношування, профіль, контактна взаємодія, метод скінченних елементів.*

Найважливішим конструктивним геометричним параметром алмазної імпрегнованої бурової коронки є профіль робочої поверхні.

Нині доволі важко зберегти задану форму профілю робочого торця до повного відпрацювання бурової коронки без додаткового оснащення матриці армуючими породоруйнівними елементами. У цьому зв'язку актуальна мета – якнайточніше змоделювати знос і зміну форми робочої поверхні імпрегнованої бурової коронки для того, щоб можна було визначити найбільш вразливі місця на робочому торці матриці.

В останні десятиліття запропоновано значну кількість рівнянь зношування, що базуються на концепціях механіки руйнування. Ці рівняння включають характеристики втомної міцності матеріалів [1], граничні напруги крихкого руйнування [2], критичні значення енергії абсорбції [3] та ін. Такі теорії значно розширюють кількість параметрів, які впливають на зношування, включаючи параметри, що характеризують властивості матеріалів. Рівняння зношування, отримані при вивченні різних механізмів зношування наведено у таблиці [4].

У таблиці H означає твердість матеріалу, коефіцієнт K має певне значення для кожного конкретного механізму зношування і моделі, використаної для його вивчення. Як впливає з наведених рівнянь, основними зовнішніми характеристиками, що впливають на швидкість зношування, є контактний тиск p і відносна швидкість ковзання V . Результати аналізу великої кількості рівнянь зношування, отриманих як теоретично, так і на підставі опрацювання результатів трибологічних випробувань на зношування, засвідчують, що в багатьох випадках залежність

швидкості зношування від тиску і швидкості ковзання можливо навести у вигляді [3] $\frac{\partial w_*}{\partial t} = K_w p^\alpha V^\beta$,

де параметри K_w, α, β є функціями не лише матеріалу, що зношується, а усього процесу контактної взаємодії. Щодо теоретичних постановок зносоконтактних задач, див. напр. [4].

Рівняння зношування, отримані при вивченні різних механізмів зношування

Автор	Рівняння	Фізичний механізм
Хольм (1946) [1] Арчард (1953) [2]	$\frac{\partial w_*}{\partial t} = K \frac{pV}{H}$	Адгезійний
Крагельский (1968) [3]	$\frac{\partial w_*}{\partial t} = Kp^\alpha V (\alpha > 1)$	Втомний
Рабинович (1965) [4]	$\frac{\partial w_*}{\partial t} = K \frac{pV}{H}$	Абразивний, фреттинг

У подальшому обмежимося законом зношування у формі $\dot{w} = K\sigma_n V$. Вектор нормального навантаження $\mathbf{T}_n = \sigma_n \mathbf{n} + \tau_{n\varphi} \mathbf{e}_\varphi + \tau_{nk} \mathbf{k}$, де \mathbf{n} і \mathbf{k} – відповідно нормальний і дотичний одиничні вектори у площині Oxz , (рис. 1.)

Робота руйнування виконується силою $\tau_{n\varphi}$, пов'язаною з нормальним тиском σ_n законом типу Кулона: $\tau_{n\varphi} = K_p \sigma_n$, $K_p = 0.2 \div 0.5$ згідно з [5]. Нормальна компонента вектора \mathbf{T}_n , $\sigma_n = \sigma_n(r, f(r))$ в загальному випадку має бути визначена шляхом розв'язання контактної задачі "коронка – забій".

Швидкість нормального зношування $\dot{w} = \partial w / \partial t$: для близьких моментів часу t_1 і t_2 , $\dot{w} = \Delta w / \Delta t = (w(t_2) - w(t_1)) / (t_2 - t_1)$. Вважаючи величину $\dot{w}(t_1)$ відомою, приріст зносу запишемо як $\Delta w \approx \dot{w}(t_1) / \Delta t$. Тоді закон еволюції поверхні (рис. 2) від t_1 до t_2 (і алгоритм розрахунку) є таким:

$$f(r, t + \Delta t) - f(r, t) = \Delta w / \cos \varphi = K_{eff}(r) \sigma_n(r, t) \omega r \sqrt{1 + [f'(r, t)]^2} \Delta t$$

або

$$\frac{\partial f(r, t)}{\partial t} = \Delta w / \cos \varphi = K_{eff}(r) \sigma_n(r, t) \omega r \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(r, t)}{\partial r} \right]^2}. \quad (1)$$

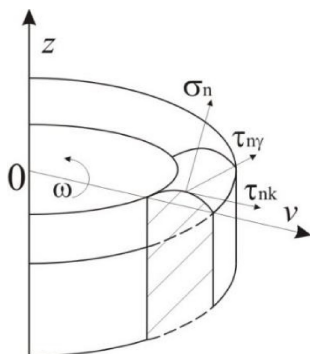


Рис. 1. Вектор нормального навантаження на робочій поверхні коронки

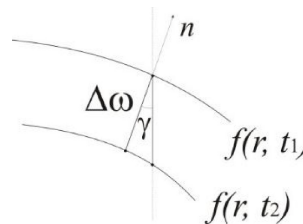


Рис. 2. Еволюція поверхні, що зношується

З урахуванням викладеного, еволюція профілю модельної коронки описується диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial f(r, t)}{\partial t} = K_{eff}(r) \sigma_{n,eff}(r, t) \omega r \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(r, t)}{\partial r} \right]^2} \quad (2)$$

Єдиним параметром в рівнянні (2), який потребує визначення, є ефективний нормальний тиск $\sigma_{n,eff}(r, t)$. Традиційно вживана оцінка $\sigma_n = \frac{F}{S} \cos \varphi$ не є адекватною, оскільки не враховує контактний характер взаємодії коронки з породою. Так, для початкового плоского профілю $f(r, 0) = \text{const}$, $\sigma_n = \frac{F}{S} = \text{const}$ і $\frac{\partial f(r, t)}{\partial r} = 0$. Припускаючи $K_{eff}(r) = \text{const}$, маємо $\frac{\partial f}{\partial r} = Cr$, звідки

$f(r, t) = Crt + C_0$, тобто зношування мало би давати плоский похилий профіль наведений на рис. 3а, що не відповідає дійсності.

Реалістичнішим уявляється профіль, показаний на рис. 3 б, для якого характерне підвищене зношування периферійних ділянок $r \rightarrow R_1$ і $r \rightarrow R_2$. У межах прийнятої моделі зношування, його чинником може бути лише підвищений тиск на цих ділянках, що цілком узгоджується (принаймні, якісно), з характером розподілу тиску за контактної взаємодії штампу та породи. У [6] показано, що чисельний метод механіки контактної взаємодії дає задовільний прогноз характеру зношування бурових доліт, тому є підстави вважати, що і для бурових коронок такий підхід повинен бути продуктивним. У подальшому використовуватимемо чисельний метод, що забезпечує аналіз модельної крайової задачі у реалістичній постановці як щодо геометрії, так і властивостей матеріалів. Як показано раніше, метод скінчених елементів забезпечує визначення $\sigma_n(r, t)$ для довільного профілю бурової коронки.

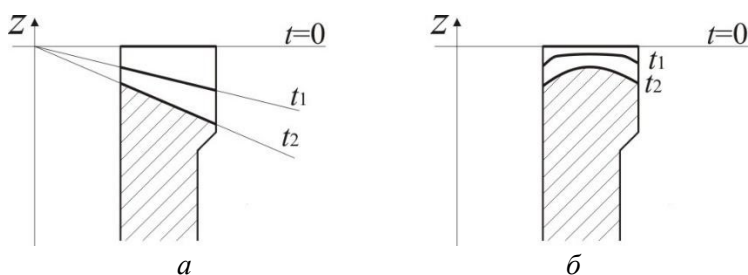


Рис. 3. До вибору способу розрахунку тиску

Чисельний алгоритм прогнозування еволюції форми поверхні використовує скінчено-елементну дискретизацію за $R_1 \leq r_n \leq R_2$ та скінченно-різницеву дискретизацію в часі $0 \leq t \leq t_1$ з кроком dt (для простоти, постійним). Тоді, для кожного дискретного моменту часу $t_m = m dt$ маємо співвідношення

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial r} &\approx \frac{f(r_{n+1}, t_m) - f(r_{n-1}, t_m)}{2\Delta r}, \quad 1 \leq n \leq N-1; \\ \frac{\partial f(r_0, t_m)}{\partial r} &\approx \frac{f(r_1, t_m) - f(r_0, t_m)}{\Delta r}; \quad \frac{\partial f(r_N, t_m)}{\partial r} \approx \frac{f(r_N, t_m) - f(r_{N-1}, t_m)}{\Delta r} \end{aligned} \quad (3)$$

З іншого боку, для кожної фіксованої точки поверхні $r_n = R_1 + n dr$, явну скінченно-різницеву схему Ейлера по часу записано як

$$\frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial t} \approx \frac{f(r_n, t_{m+1}) - f(r_n, t_m)}{\Delta t} \quad (4)$$

Таким чином, чисельний алгоритм прогнозування еволюції профілю бурової коронки такий:

I. Ефективний коефіцієнт зношування $K_{eff}(r)$ розраховується один раз і в подальшому вважається заданим, як і початковий профіль $f(r, 0)$.

II. На кожному кроці $t_m = m\Delta t$ по часу, викладеним раніше методом скінчених елементів розв'язується контактна крайова задача і визначається $\sigma_{neff}(r_n, t_m)$ як масив значень ($1 \leq n \leq N-1$) (крайні точки опускаються і до визначаються окремо).

III. Профіль бурової коронки в наступний момент часу $t_{m+1} = (m+1)\Delta t$ визначається з рівняння (4), записаного для вузлових точок просторової та часової сіток:

$$\frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial t} = K_{eff}(r_n) \sigma_{neff}(r_n, t_m) \omega r_n \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial r} \right]^2} \quad (5)$$

або

$$f(r_n, t_{m+1}) = f(r_n, t_m) + K_{eff}(r_n) \sigma_{neff}(r_n, t_m) \omega r_n \sqrt{1 + \left[\frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial r} \right]^2} \Delta t, \quad (6)$$

де просторові похідні $\frac{\partial f(r_n, t_m)}{\partial r}$ обчислюють за формулою (3).

Для перевірки працездатності запропонованого алгоритму, розглянемо задачу про вдавлювання з обертанням кільцевого, прямокутного у плані штампа, аналітичний розв'язок якої відомий [4]. Одержаний там вираз для асимптотичної (при $t \rightarrow \infty$) форми профілю основи штампа у прийнятих позначеннях має вигляд

$$f_{\infty}(r) - f_{\infty}(R_1) = \frac{2F_z(1-\nu^*)}{\pi^2 E^* (R_2^2 - R_1^2)} \left[\int_{R_1/r}^1 \mathbf{K}(x) dx - \int_{R_1/R_2}^{r/R_2} \frac{\mathbf{K}(x)}{x} dx \right] \quad (7)$$

де $\mathbf{K}(x)$ – повний еліптичний інтеграл першого роду, E^* , ν^* – приведені пружні модулі [8; 9].

Вигляд профілю (7) подано на рис. 4.

Відповідний цьому профілю розподіл тиску $p_{\infty} = \frac{F_z}{2\pi(R_2 - R_1)r}$ (обернено пропорційний радіусу), що справді забезпечує однакову швидкість зношування в усіх точках профілю:

$$\frac{\partial w_*}{\partial t} = K_w p V = \frac{F_z}{2\pi(R_2 - R_1)r} 2\pi r \varpi = \frac{F_z \varpi}{(R_2 - R_1)}. \quad (8)$$

Дані наведені на рис. 5 та 6, одержані з використанням запропонованого розрахункового алгоритму. Так, на рис. 5 показано радіальний розподіл тиску для значень безрозмірного часу t_* , що становить 0,5; 1,5 і 2,5. Штрих-пунктирна лінія показує наведене вище значення p_{∞} . Як видно з рисунка, на початковому етапі спостерігається висока концентрація напружень в околі кутових точок, що відповідає відомим теоретичним розв'язкам [7; 8], і відповідно вища інтенсивність зношування матеріалу штампу. З часом, у міру зміни форми штампа, ці пікові напруження знижуються і розподіл тиску вирівнюється, наближуючись до асимптотичного значення p_{∞} , передбачуваного теорією.

Розрахункові показані на рис. 6 форми штампа в різні моменти безрозмірного часу t_* . Як бачимо, остання форма збігається з формою зображеною на рис. 4. Також отриманні розрахунки підтверджуються практичними результатами [9], що доводить достовірність одержаних даних.

Втім, на відміну від аналітичного результату (7), справедливого лише для постійного коефіцієнту зношування K_w , цей алгоритм забезпечує прогнозування еволюції профілю і у випадку змінного по радіусу $K_w = K_w(r)$. Ця ситуація, зокрема, характерна при використанні коронок з армуючими вставками. У цьому випадку, для розрахунку потрібно додатково оцінити, як вставки впливають на зносостійкість, тобто знайти ефективний коефіцієнт зношування.

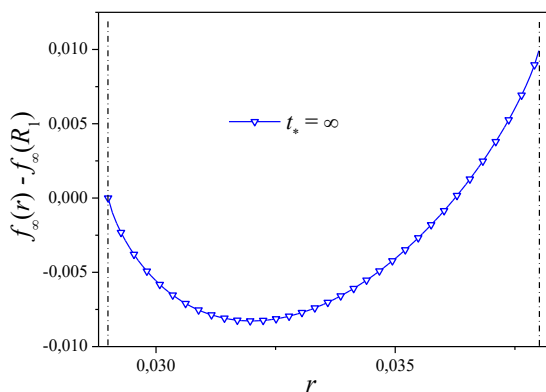


Рис. 4. Розрахунковий усталений профіль кільцевого штампа (7)

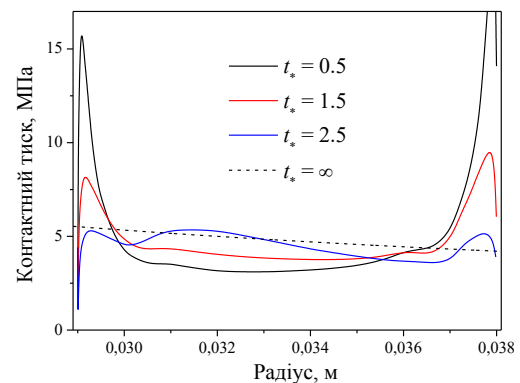


Рис. 5. Еволюція розподілу тиску під штампом

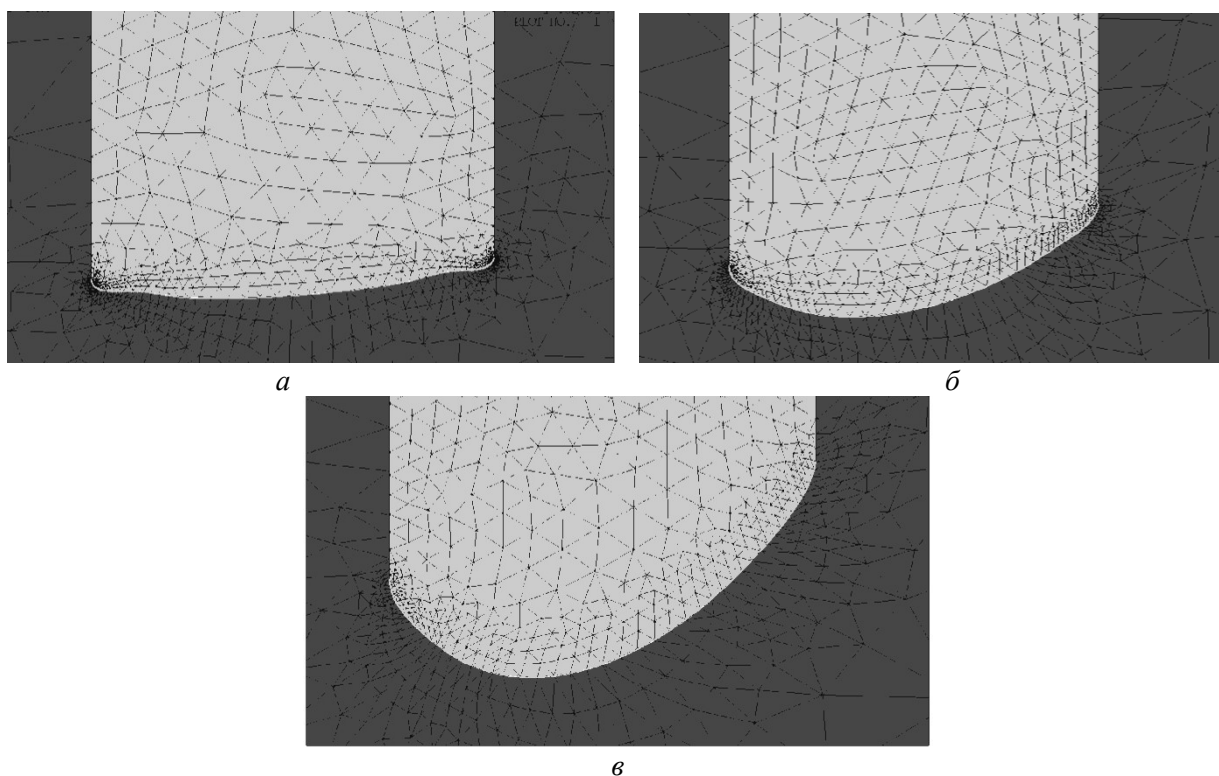


Рис. 6. Эволюция радиального профиля штампу: а – $t_* = 0,5$; б – $t_* = 1,5$; в – $t_* = 2,5$

Висновки

Отримана модель зношування робочої поверхні бурової коронки базується на чисельному аналізі модельної контактної крайової задачі механіки деформованого твердого тіла і забезпечує, на відміну від відомих з літератури, урахування не лише кінематики процесу буріння, а й специфіки контактної взаємодії інструменту та породи. Дані, одержані з використанням запропонованого розрахункового алгоритму, близькі до практичних спостережень, що свідчить про адекватність математичної моделі.

Предложена модель изнашивания рабочей поверхности буровой коронки, базирующаяся на численном анализе модельной контактной краевой задачи механики деформируемого твердого тела и обеспечивающая учет не только кинематики процесса бурения, но и специфики контактного взаимодействия инструмента и породы.

Ключевые слова: *импрегнированная коронка, модель износа, профиль, контактное взаимодействие, метод конечных элементов.*

A model of the wear of the working surface of the drill bit, which is based on the numerical analysis of the model of contact boundary value problem of solid mechanics and responsive not only the kinematics of the drilling process, but also the specifics of the contact interaction between the tool and the rock.

Keywords: *impregnated drill bit, wear model, profile, contact interaction, finite element method.*

Література

1. Крагельский И. В. Трение и износ. – М. : Машиностроение, – 1968. – 480 с.
2. Evans A.G., Marshall D.B. Fundamentals of friction and wear materials./ A. G. Evans// Metals Park, Ohio: Am. Soc. for Metals, – 1981. – 439 p.
3. Fleischer G. Energetische Methode der Bestimmung des Verschleißes // Schmierungstechnik. – 1973. – N4. – S.9 – 16.
4. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия./ И. Г. Горячева. – М. : Наука, – 2001. – 478 с.
5. Бочковский А. М. О распределении осевой нагрузки по рабочей поверхности бурового инструмента // Сверхтвердые матер. – 1983 – №5.
6. Куц В. И., Казьмин А. О. Численный анализ силового контактного взаимодействия долота с породой // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. – С.14–20.
7. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М. : Наука, 1980. – 302 с.

8. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости. – М. : Гостехтеоретиздат, 1953. – 264 с.
9. Онищин В. П. О характере износа импрегнированных коронок при бурении диабазов // Методика и техника разведки: Л. : 1965. – № 54 – С. 38–41.

Надійшла 25.06.15

УДК 622.24.05

М. В. Супрун

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ВСТАВОК ГІБРИДАЙТА НА РОБОЧОМУ ТОРЦІ БУРОВОЇ КОРОНКИ

Розраховано оптимальну кількість породоруйнівних вставок гібридайтa на робочому торці бурової коронки. Експериментально підтверджено правильність наведених розрахунків.

Ключові слова: гібридайт, CVD-алмаз, тиск, бурова коронка, інтенсивність зношування, механічна швидкість буріння.

Розроблений фахівцями Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України та Інститутом загальної фізики ім. А.М. Прохорова РАН, гібридний алмазний композиційний матеріал гібридайт є представником нового покоління гібридних надтвердих матеріалів, що поєднує позитивні властивості синтетичного, природного та CVD-алмазів. Цей матеріал армований CVD-алмазом, який по периметру частково або повністю в умовах високого тиску і температури вкритий оболонкою з алмазного композиційного термостійкого матеріалу (АКТМ). Матеріал має високі фізико-механічні властивості, що дає змогу ефективно використовувати його для оснащення бурового інструменту [1].

Особливо слід зауважити про прояв під час роботи породоруйнівних елементів з гібридайтa очевидного ефекту «самозаточування», тобто появу при зношуванні рівномірної конусності на робочому торці елементів при вершині армуючої вставки з CVD-алмазу [2]. У свою чергу, це зумовлює збільшення глибини зони передруйнування [3] та середнього розміру часток шламу [4], а отже, зменшення енергомісткості буріння. Втім необхідно, щоб тиск на вставках був достатнім для реалізації цього сценарію: у крайньому разі, якщо вся поверхня заповнена вставками, навряд чи варто очікувати їх позитивного впливу на швидкість буріння.

Мета цієї роботи – визначити оптимальну кількість породоруйнівних вставок гібридайтa на робочій поверхні алмазної імпрегнованої бурової коронки, що сприятиме підвищенню механічної швидкості буріння, та зменшить інтенсивність зношування цієї коронки за стандартних режимів буріння.

Остаточно відповісти щодо оптимальної кількості вставок може лише експеримент (і відповідь вочевидь залежатиме від конкретних умов застосування інструменту). Проте наближену попередню оцінку можна дати з низки простих міркувань.

З метою оцінювання оптимальної кількості породоруйнівних вставок гібридайтa розглянули модель бурової коронки типу БС06 діаметром 76 мм (рис. 1).

Внутрішній радіус $R_1 = 29$ мм, зовнішній радіус $R_2 = 38$ мм, а прикладена до коронки осьова сила $F_z = 1250$ даН. Тоді середній тиск на робочу поверхню коронки $\sigma_{n1} = 10$ МПа. Згідно з оцінювання зношування матриці бурової коронки у стаціонарному режимі нормальний тиск на вставку з гібридайтa можна визначити за формулою

$$\sigma_{n2} = \frac{K_1}{K_2} \sigma_{n1} \quad (1)$$

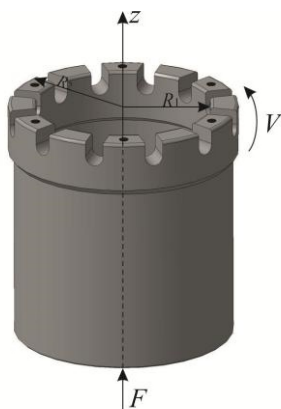


Рис. 1. Модель бурової коронки

де K_1 , K_2 – коефіцієнт зношування відповідно матриці бурової коронки та породоруйнівних вставок.