

Геликоидальные оболочки, их расчет и применение в буровых установках

Приходько Себастьян Николаевич

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Студент

Аннотация

Целью данного исследования является проведение расчётов геликоидальных оболочек, а также рассмотрение принципов работы машин, применяющие данную технологию. Использованы поисковые, аналитические и сравнительные методы исследования. В результате были выполнены расчёты геликоидальных оболочек и разобраны принципы функционирования конструкций, оснащенных данной технологией.

Ключевые слова: строительство, расчет, геликоидальные оболочки, бур, скважина, геликоид, наклон, рабочий орган.

Helical shells, their calculation and application in drilling rigs

Prikhodko Sebastian Nikolayevich

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Student

Abstract

The purpose of this study is to carry out calculations of helical shells, as well as to consider the principles of operation of machines using this technology. Search, analytical and comparative research methods were used. As a result, calculations of helical shells were performed and the principles of functioning of structures equipped with this technology were analyzed.

Keywords: construction, calculation, helical shells, drill, well, helicoid, tilt, working body.

1. Введение

Геликоидальные оболочки известны еще с древних времен, когда было предложено использование винта Архимеда для подъема воды на небольшие высоты (рис.1). Этот принцип, основанный на форме винтовой поверхности, с течением времени нашел широкое применение, в том числе в технологии бурения. В частности, геликоидальные оболочки стали важной частью конструкции шнековых лопастных долот, которые применяются при проходке различных типов скважин. Эти скважины могут иметь самые разные назначения, включая геологоразведку, гидрогеологические исследования, сейсмическое зондирование, а также использование для дренажа и других технических целей.



Рисунок 1. Винт Архимеда

Геликоидальные поверхности могут быть разных типов, включая прямые, косые, развертывающиеся и псевдоразвертывающиеся формы. Каждый тип обладает своими особенностями, которые играют важную роль в эффективности работы соответствующих устройств и машин.

В статьях М.И. Рынковской и Д.М. Анненко, С.В. Мартынова производится расчет геликоидальных оболочек и анализируются полученные результаты [1, 3, 5]. В публикации Е. Хабидуллаулы, Д.В. Быстровой, А.Д. Зефириной, В. Жан Поль рассматривается применение геликоидальных оболочек в инженерной отрасли [4]. В работе Сорокина А. Г. выполняется расчет нагруженной и деформированной геликоидальной оболочки [2].

Целью исследования является проведение расчётов геликоидальных оболочек, а также рассмотрение принципов работы машин, применяющие данную технологию.

В работе были выполнены расчёты геликоидальных оболочек и разобраны принципы функционирования конструкций, оснащенных данной технологией.

2. Принцип работы буровых машин с винтовыми рабочими органами и их применение

Бурение различных типов скважин и сооружение шпуров — это сложный процесс, который требует использования специализированных машин (рис.2). Данная техника оснащена рабочим органом, выполненный в виде винта или шнековой лопасти.



Рисунок 2. Бурение шпура

Важным элементом в конструкции бура является лопасть долота, представляющая собой режущее лезвие, имеющие форму геликоида. Именно данная форма поверхности позволяет не только эффективно «резать» породу, но и поднимать ее вверх по винтовым канавкам, что значительно ускоряет рабочий процесс.

Особенностью конструкции буровых машин является то, что режущее лезвие лопасти, могут иметь различный угол наклона по отношению к оси долота. Этот угол напрямую влияет на тип геликоида, который образуется при вращении лопасти. В зависимости от угла наклона можно выделить:

- Прямой геликоид (Угол между осью долота и лопастью остается постоянным, что дает возможность образовывать прямолинейные спиральные канавки. Такой тип чаще всего используется для бурения в твердых породах, где необходима высокая стабильность и эффективность)
- Косой геликоид (Угол наклона лопасти варьируется. Это может быть полезно в тех случаях, когда требуется бурить в более мягких или рыхлых материалах, поскольку такой тип поверхности может уменьшить сопротивление и повысить эффективность удаления породы) (рис.3).

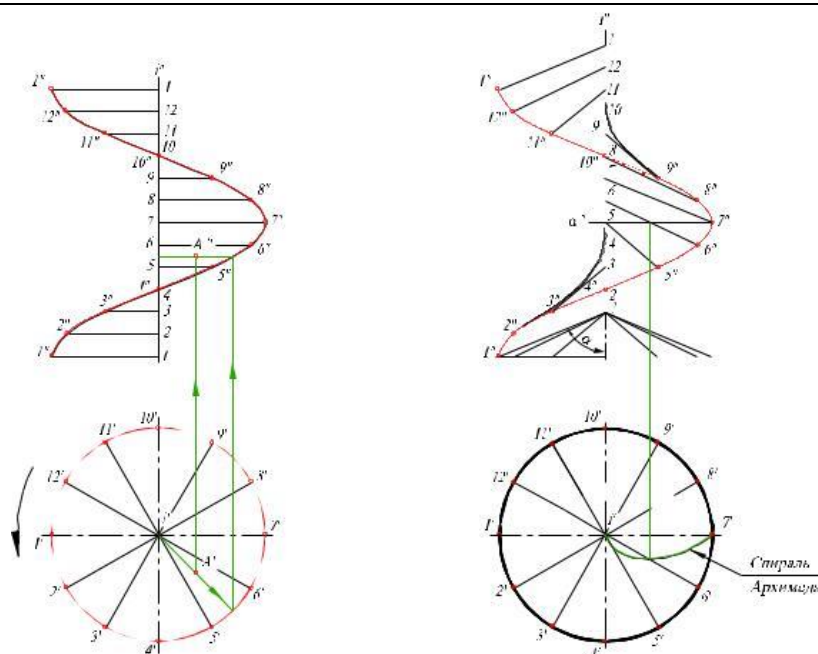


Рисунок 3. Прямой и косой геликоид

Чем точнее выполнена настройка угла наклона, тем более эффективно работает весь механизм, тем меньше вероятность образования застревания или перегрева инструмента.

Буровые машины с винтовыми рабочими органами используются в самых различных отраслях, таких как геологоразведка, добыча полезных ископаемых, строительство и инженерно-геологические изыскания. В зависимости от целей бурения и типа грунта, могут быть использованы различные модификации буровых машин с винтовыми лопастями.

3. Современные методы расчета геликоидальных оболочек

Современные методы расчета геликоидальных оболочек широко применяются в инженерном проектировании. Среди наиболее известных методов — метод Л.И. Соломона, метод конечных элементов и метод В.Г. Рекача, который использует тригонометрические ряды. На практике большинство инженерных расчетов проводится с использованием специальных программ, основанных на методе конечных элементов.

Метод В.Г. Рекача заключается в составлении уравнения геликоида в параметрической форме

$$x = u \cos v, \quad y = u \sin v, \quad z = cv + f(u)$$

c — смещение образующей АВ при повороте ее на 1 рад или отношение скорости поступательного движения к круговой скорости

u, v — криволинейные координаты точки С геликоида

$|u|$ — расстояние от оси z геликоида

v — угол поворота образующей АВ

$f(u)$ — уравнение профиля АВ

Для прямого геликоида $f(u)=0$, тогда уравнение будет иметь вид

$$x = u \cos v, \quad y = u \sin v, \quad z = cv$$

Коэффициенты первой квадратичной формы поверхности записываются следующим образом

$$A^2 = 1 + f_u^2(u), \quad F = AB \cos \chi = cf_u(u), \quad B^2 = u^2 + c^2$$

Второй коэффициент квадратичной формы для геликоида

$$L = uf_{uu}(u)/\Delta, \quad M = -c/\Delta, \quad N = u^2 f_u(u)/\Delta$$

где $\Delta = \sqrt{A^2 B^2 - F^2} = \sqrt{[1 + f_u^2(u)]u^2 + c^2}$.

Будем использовать приближенные значения основных квадратичных форм поверхности прямых геликоидов, пренебрегая c^2 по сравнению с u^2

$$A = 1, \quad F = 0, \quad B \approx u, \quad L = 0, \quad M \approx -c/u, \quad N = 0$$

Приведем дифференциальные уравнения Е. Рейснера

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi = -Eh \frac{H}{\pi} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial v} \right),$$

$$D \nabla^2 \nabla^2 u_z = Z + \frac{H}{\pi} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right)$$

Проводим преобразования и получаем уравнение

$$\nabla^4 \nabla^4(t, v) \Phi(t, v) + p^2 \nabla_k^2 \nabla_k^2(t, v) \Phi(t, v) = -e^{4t} Z(t, v) / D,$$

где $t = \ln r, \quad p^2 = \frac{EhH^2}{\pi^2 D} = \frac{12(1-\nu^2)H^2}{\pi^2 h^2}$

H — шаг винта

∇^4 — гармонический оператор

∇_k^2 — дифференциальный оператор второго порядка

Решение данного дифференциального уравнения осуществляется посредством применения тригонометрических рядов Фурье

$$\Phi(t, v) = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m(t) \sin mv$$

Это позволило получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых можно определить коэффициенты тригонометрических рядов Фурье $\Phi_m(t)$.

В процессе решения получили четыре комплексных действительных корня. Тогда в уравнении, определяющего прогиб $u_z = -\nabla(t, v)\Phi(t, v)$, члены ряда $\Phi_m(t, m)$ принимают вид

$$\Phi_m(t, m) = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3 e^{k_3 t} \cos z_3 t + A_4 e^{k_4 t} \sin z_4 t + \\ + A_5 e^{k_5 t} \cos z_5 t + A_6 e^{k_6 t} \sin z_6 t + A_7 e^{\alpha_7 t} + A_8 e^{\alpha_8 t} + A e^{4t},$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_7, \alpha_8$ — действительные корни характеристического уравнения
 k_3, k_4, k_5, k_6 — действительные части комплексных корней $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$
 z_3, z_4, z_5, z_6 — мнимые части комплексных корней $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$

Таким образом первые восемь слагаемых являются общим решением однородного уравнения, последние — частным.

4. Расчет геликоидальной оболочки

В вычислениях будет участвовать прямой геликоид — модель лопасти бурового инструмента со следующими характеристиками:

Радиус основания лопасти: $u = 0,15$ м

Толщина лопасти $h = 3$ мм = $0,003$ м

Шаг винта: $H = 0,25$ м

Материал — сталь Ст3: $\sigma_{ст3} = 250$ МПа, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$

Нагрузка от породы на поверхность лопасти: $q = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м²

Перейдем к определению геометрических параметров геликоида, а именно кривизны винтовой поверхности:

$$k = \frac{4\pi^2 u}{H^2 + 4\pi^2 u^2}$$

$$k = \frac{4\pi^2 \times 0,15}{0,25^2 + 4\pi^2 \times 0,15^2} \approx 3,21 \text{ м}^{-1}$$

Тогда радиус кривизны равен:

$$R = 1/k = 0,312 \text{ м}$$

Рассчитаем модуль изгибной жесткости:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{2,1 \times 10^{11} \times (0,003)^3}{12(1 - 0,3^2)} \approx 520 \text{ Н}$$

Вычислим максимальные нормальные напряжения, возникающие в геликоиде:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y}{I} = \frac{qR^2}{h/2} = \frac{1,2 \times 10^5 \times 0,312^2}{0,0015} \approx 7,8 \times 10^6 \text{ Па}$$

Определим прогиб центральной линии посредством приближенной формулы для цилиндрических оболочек:

$$w_{\max} = \frac{qR^4}{D\pi^4}$$
$$w_{\max} = \frac{1,2 \times 10^5 \times 0,312^4}{520 \times \pi^4} \approx 0,27 \text{ мм}$$

Таким образом, полученные значения показывают, что геликоидальная лопасть обладает достаточной жёсткостью при рабочем давлении порядка 10^5 Па. Запас прочности при предельном напряжении для стали Ст3 составляет:

$$n = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sigma_{\max}} = \frac{250 \times 10^6}{7,8 \times 10^6} \approx 32$$

Полученные данные свидетельствуют о значительном запасе устойчивости.

5. Заключение

Геликоидальные оболочки и винтовые рабочие органы играют ключевую роль в бурении, обеспечивая высокую эффективность разрушения породы и удаления шлама. Разнообразие форм геликоидальных поверхностей позволяет адаптировать буровые машины для работы с различными типами грунтов. Совмещение вращательного и поступательного движения, а также оптимизация угла наклона лопастей, позволяет значительно повысить производительность и стабильность процесса бурения. Современные методы расчета и проектирования таких конструкций продолжают развиваться, что открывает новые возможности для их применения в инженерных и горнодобывающих отраслях.

Библиографический список

1. Рынковская М.И. К вопросу расчета прямых геликоидальных оболочек по методу В.Г. Рекача // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. №2. С. 63-66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11531115>
2. Сорокина А.Г. Расчет формы деформированной геликоидально симметричной оболочки открытого профиля при больших перемещениях // Проблемы механики современных машин. 2012. С. 105-108. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26381103>
3. Анненко Д.М., Мартынов С.В. Анализ расчета прямых геликоидальных оболочек по методу В.Г. Рекача // Уральский научный вестник. 2018. №2. С. 32-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32294250>
4. Хабидуллаулы Е., Быстрова Д.В., Зефирова А.Д., Жан Поль В. Обзор геометрии и применения геликоидальных оболочек в инженерном деле // Перспективы науки. 2019. №4. С. 92-98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32294250>

<https://elibrary.ru/item.asp?id=38566167>

5. Рынковская М.И. Применение и расчет геликоидальных оболочек в архитектуре и строительстве//Вестник российского университета дружбы народов. серия: инженерные исследования. 2012. №4. С. 84-90. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18135763>