

БУРОВЫЕ МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности 21.05.03*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра бурения скважин

БУРОВЫЕ МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности 21.05.03*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

УДК 622.24.05 + 622.242 (073)

БУРОВЫЕ МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Н.И. Васильев, М.Ю. Мерзляков, А.В. Подоляк*. СПб, 2019. 66 с.

Рассмотрены методы инженерных расчетов основного бурового оборудования и инструмента: буровых вышек и мачт, колонн бурильных труб, эксплуатационных обсадных колонн.

Предназначены для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки» по специализации «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».

Научный редактор проф. *Н.И. Николаев*

Рецензент генеральный директор *В.В. Свистун* (ООО «Геокем»)

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с содержанием курса «Буровые машины и механизмы» в пособии приводятся работы для закрепления теоретического материала по методике инженерного расчета бурового оборудования и инструмента. Наиболее существенными из них, как представляется авторам, являются расчеты, связанные с определением геометрических размеров и прочностных характеристик буровых вышек и мачт, расчеты по оценке прочности колонн бурильных и обсадных труб.

Данные методические указания дают некоторые основные приемы расчета на базе знания специальных и фундаментальных дисциплин: физики, математики, сопротивления материалов, теоретической механики и др. В пояснениях к порядку расчета инженерные формулы сопровождаются теоретическим обоснованием, что позволяет студентам и специалистам по бурению, использующим пособие, глубоко и неформально воспринимать физический смысл действия расчетных нагрузок. Разумеется, приведенные задачи не исчерпывают всего объема необходимых для оценки прочности, геометрических размеров, кинематических и динамических характеристик расчетов, связанных с буровыми машинами и инструментом. Впоследствии их перечень должен расширяться по мере совершенствования техники и технологии бурения скважин и, естественно, курса «Буровые машины и механизмы».

1. РАСЧЕТЫ БУРОВЫХ ВЫШЕК И МАЧТ

Лабораторная работа 1 РАСЧЕТ ТРЕХГРАННОЙ БУРОВОЙ ВЫШКИ (ТРЕНОГИ)

Цель работы. Освоение методики расчёта по определению геометрических размеров треноги и площади поперечного сечения её ног. Выбор соответствующих расчёту бревен или стандартных буровых труб для изготовления вышки.

Задание

В соответствии с исходными данными определить высоту треноги и длины её ног; допустимую силу веса на крюке; нагрузку, действующую на верх треноги; площадь поперечного сечения ног вышки.

Начальные условия

Конструкция скважины, тип бурового станка, материал, из которого изготавливаются ноги треноги (дерево или сталь), методика, по которой рассчитывается площадь поперечного сечения ног вышки (по формуле Эйлера или по техническим условиям на проектирование).

Общие положения

Буровые вышки и мачты предназначены для выполнения спуско-подъемных операций с бурильными и обсадными трубами; поддержания бурильной колонны на талевой системе при бурении с разгрузкой; установки свечей, извлеченных из скважины; размещения средств механизации и автоматизации спуско-подъемных операций.

Пирамидообразные трехгранные буровые вышки называют треногами. Их обычно применяют для бурения неглубоких вертикальных и наклонных скважин глубиной до 300-400 м в труднодоступных, малоосвоенных районах, где не всегда экономически целесообразно использовать серийно выпускаемые вышки и мачты.

Порядок выполнения работы

В соответствии с конструкцией скважины может быть задан расчет треноги для бурения как вертикальной, так и наклонной скважин.

1. Определение высоты треноги для вертикального бурения и наклонной высоты для наклонного бурения (рис. 1).

$$H = k \cdot l, \quad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий возможный переподъем и размеры элеватора с серьгой, $k = 1,3 \div 1,5$; l – длина свечи, выбираемая в соответствии с конструкцией скважины.

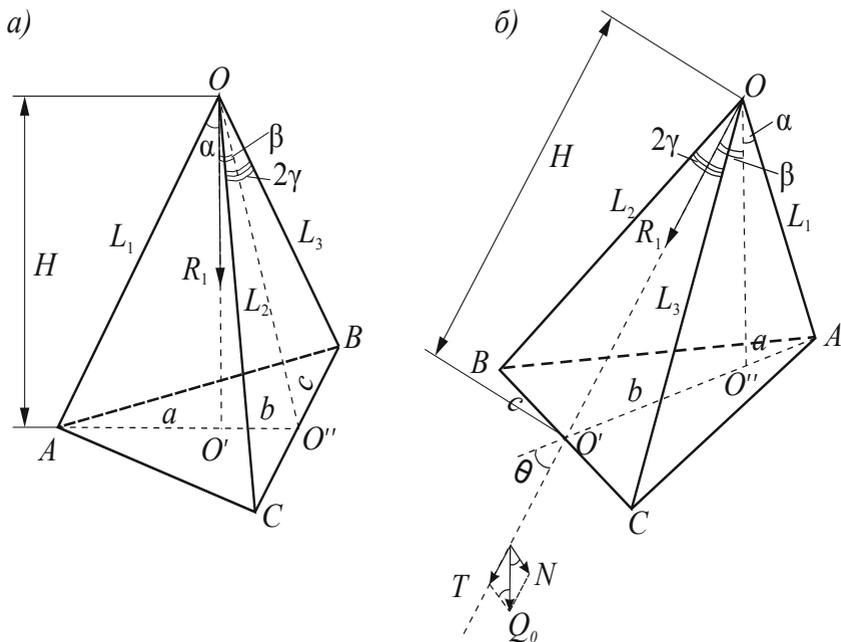


Рис. 1. Трехгранная буровая вышка (тренога) для вертикального (а) и наклонного (б) бурения

2. Определение длины ног треноги.

2.1. Для вертикального бурения.

В случае вертикальной треноги величинами b и c задаются, исходя из габаритов бурового оборудования и схемы его размещения: $b = 1,4 \div 2,2$ м, $c = 4,8 \div 6,2$ м. Затем вычисляют длину OO'' по формуле:

$$OO'' = H/\cos\beta, \quad (2)$$

где $\beta = \arctg(b/H)$.

Длины ног треноги L_2 и L_3 определяются следующим образом:

$$L_2 = L_3 = OO''/\cos\gamma, \quad (3)$$

где $\gamma = \arctg[c/(2 \cdot OO'')]$.

Длина L_1 рассчитывается по формуле:

$$L_1 = H/\cos\alpha, \quad (4)$$

где угол α определяется из условия обеспечения равнонагруженности ног треноги: $\alpha = \arcsin(2\sin\beta\cos\gamma)$.

2.2. Для наклонного бурения.

При расчете треноги для наклонного бурения задаются величиной c ($c = 4,8 \div 6,2$ м). В этом случае $b = H \cdot \cos\theta$.

Длины ног треноги L_2 и L_3 в этом случае вычисляются по формуле:

$$L_2 = L_3 = H/\cos\gamma, \quad (5)$$

где $\gamma = \arctg[c/(2H)]$.

Длина L_1 находится по следующему выражению:

$$L_1 = OO''/\cos\alpha = H(\cos\beta/\cos\alpha), \quad (6)$$

где угол α находят по условию $\alpha + \beta = 30 \div 40^\circ$.

3. Определение наибольшей силы веса на крюке.

3.1. В случае вертикальной скважины сила веса на крюке равна:

$$Q_{кр} = \beta \cdot Q_0, \quad (7)$$

где β – коэффициент, учитывающий сопротивление движению и прихват труб в скважине, $\beta = 1,5 \div 2,0$; Q_0 – наибольшая сила веса колонны бурильных или обсадных труб в соответствии с конструкцией скважины, $Q_0 = qL$; q – сила веса 1 м труб; L – длина колонны буровых труб.

3.2. В случае наклонной скважины сила веса на крюке вычисляется по формуле:

$$Q_{кр} = Q_0 \cdot \sin\theta + f \cdot Q_0 \cdot \cos\theta = Q_0(\sin\theta + f \cdot \cos\theta), \quad (8)$$

где f – коэффициент трения стали о породу, $f = 0,2 \div 0,3$.

4. Определение величины нагрузки, действующей на верх треноги:

$$R_1 = 1,5 \cdot \psi \cdot n \cdot Q_L, \quad (9)$$

где 1,5 – коэффициент запаса (50 % перегрузки по правилам техники безопасности); ψ – коэффициент, учитывающий перегрузку лебедки, $\psi = 1,2 \div 1,5$; n – число сокращающихся струн плюс рабочий и неподвижный (если есть) концы каната, $n = n_1 + 1(2)$; $n_1 = Q_{кр}/Q_L$ – число сокращающихся струн талевой оснастки; Q_L – грузоподъемность лебедки.

5. Определение площади сечения ноги треноги с учетом материала и формы сечения (площадь сечения ноги треноги F принимается одинаковой для всех ног вышки).

5.1. По формуле Эйлера величина расчетной продольной силы рассчитывается следующим образом:

$$P_p = \pi^2 \cdot E \cdot I / (m \cdot l^2), \quad (10)$$

где P_p – величина расчетной продольной силы; E – модуль упругости материала (модуль Юнга), $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа для стали и $E = 0,1 \cdot 10^5$ МПа для дерева; I – осевой момент инерции се-

чения; m – коэффициент запаса на устойчивость, $m = 5$ для стали, $m = 10$ для дерева.

Осевой момент инерции для круглого сечения:

$$I = (\pi \cdot D^4)/64. \quad (11)$$

Осевой момент инерции для кольцевого сечения:

$$I = \pi(D_1^4 - D_2^4)/64. \quad (12)$$

В случае вертикальной скважины величину расчетной продольной силы можно вычислить по формуле:

$$P_p = R_1 \sin\beta / \sin(\alpha + \beta) \text{ или } P_p = R_1 \sin\alpha / (2 \sin(\alpha + \beta) \cos\gamma). \quad (13)$$

Расчетная продольная сила для наклонной скважины:

$$P_p = R_1 / (2 \cos\gamma). \quad (14)$$

Диаметр ноги треноги определяется из соотношения:

$$I = (\pi \cdot D^4)/64 = P_p \cdot m \cdot l^2 / (\pi^2 \cdot E) \Rightarrow \\ \Rightarrow D = \sqrt[4]{64 P_p \cdot m \cdot l^2 / (\pi^3 \cdot E)}. \quad (15)$$

Для дерева $D \leq 28$ см.

Для кольцевого сечения принимается отношение внешнего и внутреннего диаметров $D_1/D_2 = \delta$ (принимают по табл. 1), где D_2 вычисляется следующим образом:

$$D_2 = \sqrt[4]{64 P_p \cdot m \cdot l^2 / [\pi^3 \cdot E (\delta^4 - 1)]}. \quad (16)$$

Таблица 1

Характеристики труб для изготовления ног треноги

D_1/D_2 , мм/мм	42/32	50/39	63,5/51,5	73/63	89/79	108/98	127/117	146/136	168/154
q , даН/м	4,56	6,04	8,51	8,38	10,36	12,70	15,04	17,39	27,39
δ	-	-	-	1,16	1,13	1,10	1,08	1,07	1,09
$F_{бр}$, см ²	-	-	-	10,7	13,2	16,2	19,2	22,1	35,4

После вычисления D_2 подбирается стандартная буровая труба.

В случае круглого сечения при $D > 28$ см необходимо уменьшить расчетную длину l (ноги треноги) путем, например, установки пояса жесткости.

Справедливость применения формулы Эйлера проверяется по условию: $\lambda \geq 110$ для дерева и $\lambda \geq 100$ для стали (здесь λ – продольная гибкость, $\lambda = l/i$; i – радиус инерции сечения, $i = \sqrt{I/F}$ для круглого сечения $i = D/4$, для кольцевого сечения $i = \sqrt{(D_1^2 + D_2^2)/4}$).

Если неравенство не выполняется, необходимо произвести перерасчет при измененных значениях l и F .

5.2. По техническим условиям (ТУ) на проектирование расчетное (условное) напряжение рассчитывается по формуле:

$$\sigma_p = P_p / (\varphi \cdot F_{бр}) \leq [\sigma], \quad (17)$$

где φ – коэффициент уменьшения основного допускаемого напряжения; $[\sigma]$ – основное допускаемое напряжение, $[\sigma] = 160 \div 180$ МПа для стали и $[\sigma] = 10 \div 12$ МПа для дерева (со сна, вдоль волокон); $F_{бр}$ – площадь действительного сечения (брутто).

Сначала задаются величиной φ в пределах табличных значений (табл. 2) в зависимости от материала, из которого изготавливаются ноги вышки (в числителе – для стали, в знаменателе – для дерева) [6].

Таблица 2

Значения коэффициента уменьшения основного допускаемого напряжения

λ	0	70	90	110	130	150	160	170	180	190	200
φ	$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,81}{0,60}$	$\frac{0,69}{0,38}$	$\frac{0,52}{0,25}$	$\frac{0,40}{0,18}$	$\frac{0,32}{0,14}$	$\frac{0,29}{0,12}$	$\frac{0,26}{0,11}$	$\frac{0,23}{0,10}$	$\frac{0,21}{0,09}$	$\frac{0,19}{0,08}$

Затем вычисляют $F_{бр} \geq P_p / (\varphi \cdot [\sigma])$. По величине $F_{бр}$ определяют λ и находят скорректированное φ .

Если $P_p/(\varphi \cdot F_{6p}) \leq [\sigma]$, расчет можно остановить. Если $P_p/(\varphi \cdot F_{6p}) > [\sigma]$, подбирают большие значения F_{6p} до тех пор, пока они не удовлетворят условию $P_p/(\varphi \cdot F_{6p}) \leq [\sigma]$.

Пример. Определить геометрические размеры треноги и площадь поперечного сечения ее ног. Выбрать соответствующие расчету стандартные буровые трубы для изготовления вышки. Начальные условия следующие: конструкция скважины (рис. 2), буровой станок ЗИФ-650 М (грузоподъемность лебедки 35 кН), угол наклона скважины к горизонту 75° , вышка металлическая, расчет по техническим условиям на проектирование.

Решение. Приняв $l = 12$ м и $k = 1,3$, найдем высоту наклонной треноги:

$$H = k \cdot l = 1,3 \cdot 12 = 15,6 \text{ м.}$$

В соответствии со схемой (рис. 1, б), определим угол $\beta = 90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$, длину $b = H \cdot \cos\theta = 15,6 \cdot \cos 75^\circ = 4$ м, угол $\gamma = \arctg[c/(2H)] = \arctg[5,6/(2 \cdot 15,6)] = 10,2^\circ$, угол $\alpha = 30^\circ - \beta = 30^\circ - 15^\circ = 15^\circ$.

Длины ног треноги имеют следующие значения:

$$L_2 = L_3 = H/\cos\gamma = 15,6/\cos 10,2^\circ = 15,8 \text{ м,}$$

$$L_1 = H(\cos\beta/\cos\alpha) = 15,6(\cos 15^\circ/\cos 15^\circ) = 15,6 \text{ м.}$$

Найдем длину a :

$$a = L_1 \cdot \sin\alpha = 15,6 \cdot \sin 15^\circ = 4 \text{ м.}$$

Найдем наибольшую нагрузку на крюке $Q_{кр}$, предварительно определив вес колонны бурильных труб и вес наиболее тяжелой колонны обсадных труб в соответствии с конструкцией скважины. Вес колонны бурильных

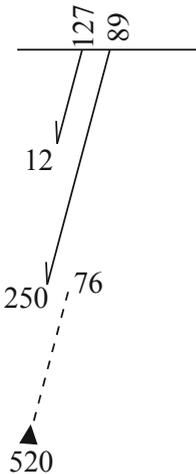


Рис. 2. Конструкция скважины

труб:

$$Q_0 = qL = 6,04 \cdot 520 = 3141 \text{ даН,}$$

где $q = 6,04$ даН (вес 1 м труб диаметром 50 мм). Вес колонны обсадных труб диаметром 89 мм и длиной 250 м:

$$Q_0 = qL = 10,36 \cdot 250 = 2590 \text{ даН.}$$

Таким образом, для дальнейшего расчета принимаем $Q_0 = 3141$ даН.

Нагрузка на крюке:

$$\begin{aligned} Q_{кр} &= Q_0(\sin\theta + f \cdot \cos\theta) = \\ &= 3141(\sin 75^\circ + 0,3 \cdot \cos 75^\circ) = 3278 \text{ даН.} \end{aligned}$$

Число сокращающихся струн:

$$n_1 = Q_{кр}/Q_L = 3278/3500 \approx 0,9.$$

Принимаем $n_1 = 1$, т. е. бурение на «прямом канате». Общее число струн $n = n_1 + 1 = 1 + 1 = 2$.

Нагрузка на верх треноги:

$$R_1 = 1,5 \cdot \psi \cdot n \cdot Q_L = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 2 \cdot 3500 = 12600 \text{ даН.}$$

Продольная сила, действующая в каждой из ног вышки L_2 и L_3 (рис. 1, б), в плоскости которых располагается продолжение оси скважины:

$$P_p = R_1 / (2 \cos \gamma) = 12600 / (2 \cos 10,2^\circ) = 6401 \text{ даН.}$$

По ТУ $F_{6p} = P_p / (\varphi \cdot [\sigma]) = 6401 / (0,32 \cdot 1800) = 11,1 \text{ см}^2$. Ближе всего к полученному значению F_{6p} подходят трубы диаметром 89/79, но их λ значительно больше 200, что недопустимо.

Принимаем трубы диаметром 127/117 с площадью сечения $19,2 \text{ см}^2$. В данном случае гибкость составит $\lambda_{127} = l/i = 15,8 \cdot 4 \cdot 10^2 / \sqrt{12,7^2 + 11,7^2} = 366$. Гибкость λ_{127} при

длине ног вышки 15,8 м превышает табличное значение. Ее можно уменьшить, скрепив ноги вышки посередине поясом жесткости. Тогда $\lambda_{127} = 183$ и $\varphi = 0,23$.

Расчетное напряжение равно:

$$\sigma_p = P_p / (\varphi \cdot F_{6p}) = 6401 / (0,23 \cdot 19,2) \approx 145 \text{ МПа} \\ < 160 \text{ МПа,}$$

что удовлетворяет ТУ. На этом расчет можно закончить.

Можно было бы поступить по-другому, взяв заведомо большее F_{6p} . Например, возьмем трубы диаметром 168/154.

Тогда $\lambda_{168} = 15,8 \cdot 4 \cdot 10^2 / \sqrt{16,8^2 + 15,4^2} = 277$. Но такого значения λ нет в таблице. Более толстостенные трубы для изготовления ног треноги выбирать нецелесообразно, поэтому окончательно остановимся на трубах диаметром 127 мм, а на ногах треноги предусмотрим пояс жесткости.

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

Лабораторная работа 2 РАСЧЕТ ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВЫШКИ

Цель работы. Освоение методики по определению усилий, возникающих в элементах четырехгранной металлической вышки (рис. 3) от полезной нагрузки, собственного веса и ветровой нагрузки. Проверка на прочность наиболее нагруженных элементов.

Задание

1. В соответствии с исходными данными определить усилия, возникающие в стержнях четырехгранной буровой

вышки от действия вертикальных нагрузок (полезной нагрузки и собственного веса вышки).

2. Найти усилия, появляющиеся в элементах вышки, от влияния ветровой нагрузки.

3. Произвести проверку на прочность наиболее нагруженных элементов вышки.

Начальные условия

Высота фонаря h_1 , ширина верхнего основания b , расстояния между поясами h_2 , h_3 и т.д., ширина нижнего основания B , высота вышки H , полезная нагрузка на крюке Q_0 , собственный вес вышки Q_B , скоростной напор ветра p_0 , диаметр и толщина стенки ног вышки d_n , диаметр и толщина стенки поясов вышки d_n и диаметр раскосов d_p .

Общие положения

Четырехгранные буровые вышки применяют при бурении вертикальных скважин глубиной свыше 250-300 м. Их изготавливают, главным образом, металлическими, но встречаются и деревянные. Материалом для изготовления металлических буровых вышек служат трубы, уголкового прокат, прутковая сталь, швеллерные балки, а для сооружения деревянных вышек используются бревна, доски и брусья.

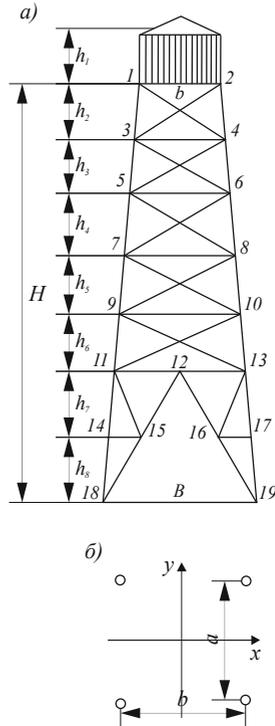


Рис. 3. Вертикальная проекция (а) и сечение (б) четырехгранной буровой вышки 1-19 – узлы

Металлические вышки в 8-10 раз долговечнее деревянных и более безопасны в пожарном отношении. Четырёхгранные вышки в плане имеют значительные габаритные размеры, поэтому для улучшения транспортабельности их выполняют разборными.

Основными элементами металлических вышек являются стойки, пояса, раскосы и хомуты. Стойки и пояса обычно изготавливают из труб, раскосы – из уголков, а хомуты – из листовой стали.

Порядок выполнения работы

1. Определение усилий в стержнях вышки от действия полезной нагрузки Q_0 .

Полезная нагрузка распределяется равномерно по ногам вышки. Под ее действием ноги вышки и верхнее основание испытывают сжатие, нижнее основание – растяжение.

Сила сжатия в ноге вышки от Q_0 и стержнях верхнего основания соответственно:

$$P_1 = Q_0 / (4 \sin \gamma); \quad P_3 = Q_0 \cdot \operatorname{ctg} \gamma / (4 \sqrt{2}), \quad (18)$$

где γ – угол наклона ноги вышки к горизонтальной плоскости:

$$\gamma = \operatorname{arctg}[\sqrt{2} \cdot H / (B - b)]. \quad (19)$$

Сила растяжения в стержнях нижнего основания:

$$P'_3 = Q_0 \cdot \operatorname{ctg} \gamma / (4 \sqrt{2}). \quad (20)$$

2. Определение усилий в стержнях вышки от действия собственного веса Q_B .

Отношение q силы веса вышки Q_B к площади ее боковой поверхности S примем, допустив, что сила веса каждой секции вышки пропорционально распределена по ее боковой поверхности:

$$q = Q_B / S. \quad (21)$$

Площадь боковой поверхности вышки можно вычислить по формуле:

$$S = 4(B + b)H/2 + 4bh_1. \quad (22)$$

Рассчитаем вес секций и нагрузку в узлах вышки от Q_B :

- площадь фонаря:

$$S_\phi = 4bh_1; \quad (23)$$

- вес фонаря:

$$Q_\phi = qS_\phi; \quad (24)$$

- площадь боковой поверхности n -й секции (проекция, спроектированная на вертикальную плоскость):

$$S_n = 4(b_n + h_n t)h_n, \quad (25)$$

где h_n – высота секции; b_n – длина верхнего (меньшего) основания грани n -й секции, вычисляемая по формуле:

$$b_n = b_{n-1} + 2h_{n-1}t. \quad (26)$$

Величина t определяется следующим образом:

$$t = \text{ctgarctg}2H/(B - b). \quad (27)$$

Тогда вес n -й секции составит:

$$Q_n = qS_n, \quad (28)$$

а нагрузка в узлах секции:

$$P_b^{(n)} = (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)/4. \quad (29)$$

По результатам вычислений заполняется таблица 3.

Таблица 3

Вес секций и нагрузка в узлах от Q_B

Секция	Площадь боковой поверхности секции, м ²	Вес секции, даН	Нагрузка в узлах секции, даН
I (фонарь)			

II			
III			
⋮			
n			

Усилия в участках ног определяются как суммарные от действия Q_0 и Q_B :

$$P_n^{(n)} = P_1 + P_{BH}^{(n)} = (Q_0/4 + P_B^{(n)})/\sin\gamma. \quad (30)$$

Усилия в поясах можно определить по формулам:

- верхнее основание:

$$P_n^1 = (Q_0/4 + P_B^1)\text{ctg}\gamma/\sqrt{2}; \quad (31)$$

- нижнее основание:

$$P_n^{(n)} = (Q_0/4 + P_B^{(n-1)})\text{ctg}\gamma/\sqrt{2}; \quad (32)$$

- для n -го пояса:

$$P_n^{(n)} = P_B^{(n)}\text{ctg}\gamma/\sqrt{2}. \quad (33)$$

Результаты вычислений можно свести в таблицу 4.

Таблица 4

Усилия в узлах вышки от действия Q_B и Q_0

Узлы	1	3	5	7	...
Усилия в участках ног, даН					
Усилия в поясах, даН					

3. Определение усилий в стержнях вышки от ветровой нагрузки. Усилия от ветровой нагрузки определяются с помощью диаграммы Максвелла-Кремоны. Для ее построения необходимо вначале определить составляющие силы ветра, отнесенные к узлам на ногах вышки. Сила ветра, действующая на n -й узел с наветренной грани (рис. 4):

$$W_n = p_0 n \beta c_a \varphi F_n, \quad (34)$$

где n – коэффициент возрастания скоростного напора с высотой; β – коэффициент, учитывающий динамическое воздействие, вызываемое пульсацией ветра, $\beta = 1 + m_{\Pi}\xi$; $m_{\Pi} = 0,12$ – коэффициент пульсации скоростного напора ветра; ξ – коэффициент динамичности, зависящий от периода свободных колебаний вышки T , при нерабочем состоянии (табл. 5); c_a – аэродинамический коэффициент; φ – коэффициент заполнения панели; F_n – расчетная площадь панели, относящаяся к n -му узлу.

Период свободных колебаний вышки вычисляется по формуле:

$$T = 3,63\sqrt{H^3 M_{\Pi} / (EI)}, \quad (35)$$

где EI – поперечная жесткость конструкции; M_{Π} – приведенная масса, вычисляемая по формуле:

$$M_{\Pi} = M_K + 0,236(M + M_C), \quad (36)$$

где M_K – масса кронблока; M – масса конструкции; M_C – масса пакета свечей.

Таблица 5

Значения коэффициента динамичности

T, c	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00
ξ	0,44	0,88	1,75	2,25	2,65	2,96

Сила ветра, действующая на n -й узел с заветренной грани:

$$W_n = p_0 n \beta c_a \varphi F_n m_3, \quad (37)$$

где m_3 – коэффициент ослабления ветра, действующего на заветренную грань.

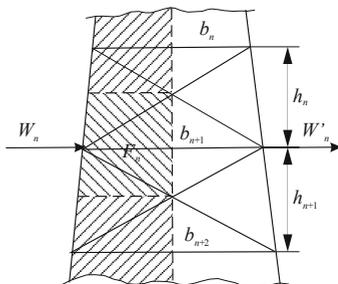


Рис. 4. Узел вышки под действием ветровой нагрузки

Значения коэффициента n в зависимости от высоты приведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения коэффициента возрастания скоростного напора					
$H, \text{ м}$	10	10-20	20-30	30-40	40-50
n	1,00	1,25	1,40	1,55	1,65

Для расчета поперечной жесткости конструкции EI (рис. 3, б) вычисляют:

$$I_x = 4I_0 + Fa^2 \text{ и } I_y = 4I_0 + Fb^2, \quad (38)$$

где I_0 и F – соответственно осевой момент инерции сечения ноги вышки и его площадь. В случае симметричной четырехгранной вышки $I_x = I_y = I$, так как $a = b$. Осевой момент инерции определяют для средней части конструкции.

Аэродинамический коэффициент c_a для стержней круглого сечения принимают по данным таблицы 7.

Таблица 7

Значения аэродинамического коэффициента						
$\rho_0 n d^2, \text{ Н}$	5	5-8	8-15	15-25	25-100	100-1000
c_a	1,2	1,0	0,7	0,5	0,6	0,7

Для обшитых поверхностей $c_a = 0,8$ с наветренной стороны и $c_a = 0,6$ с заветренной; для равнобоких уголков $c_a = 2$.

В зависимости от ширины b_1 и высоты h_0 элемента вышки, для которого вычисляется ветровая нагрузка, а также от коэффициента заполнения панели φ по таблице 8 может быть выбран коэффициент m_3 (в числителе – для $\varphi = 0,1$, в знаменателе – для $\varphi = 0,2$).

Таблица 8

Значения коэффициента ослабления ветра					
b_1/h_0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0
m_3	0,93/0,75	0,99/0,81	1,00/0,87	1,00/0,90	1,00/0,93

Для необшитой вышки обычно $\varphi = 0,15 \div 0,20$.

Расчетная площадь панели, относящаяся к n -му узлу:

$$F_n = (b_n + 2b_{n+1} + b_{n+2})(h_n + h_{n+1})/16. \quad (39)$$

Исключением из расчета W_n и W_n по изложенной форме являются W_1 и W_1 вследствие включения в расчет составляющих силы ветра, действующих на обшитый фонарь с наветренной и заветренной сторон, соответственно:

$$W_1 = p_0 n \beta 0,8 F_\phi + p_0 n \beta c_a \varphi F_1; \quad (40)$$

$$W_1 = p_0 n \beta 0,6 F_\phi + p_0 n \beta c_a \varphi F_1 m_3, \quad (41)$$

где $F_\phi = bh_1/2$; $F_1 = (3b+b_3)h_2/16$.

Построение диаграммы Максвелла-Кремоны (рис. 5) начинается с вычерчивания в выбранном масштабе в соответствии с начальными условиями в левой части листа вертикальной проекции грани (фермы) вышки. Нумеруются узлы фермы и проверяется возможность построения диаграммы по формуле $c = 2y - 3$, где c – число стержней; y – число узлов. Производится также визуальный анализ решетки фермы для подтверждения ее неизменяемости. Затем на рисунок проекции фермы наносятся векторы внешних сил (ветровой нагрузки) и реакций, приложенных к ее соответствующим узлам (рис. 5, а).

Вычисляется горизонтальная реакция опоры фермы T и вертикальные реакции ее обеих опор M и N :

$$T = \sum_{i=1}^n (W_i + W'_i) \quad (42)$$

$$M=N=[(W_1+W_1) \sum_{i=2}^n h_i + (W_2+W_2) \sum_{i=3}^n h_i + \dots + (W_{n-1}+W_{n-1}) h_n]/B. \quad (43)$$

По вычисленным значениям $W_1, W_2, \dots, W_1, W_2, \dots, T, M$ и N вычерчивается справа от вертикальной проекции грани многоугольник (прямоугольник) уравновешенных внешних

сил в удобном для построения масштабе (рис. 5, б). Он служит контуром, в пределах которого производится дальнейшее построение диаграммы усилий в элементах решетки буровой фермы от ветровой нагрузки.

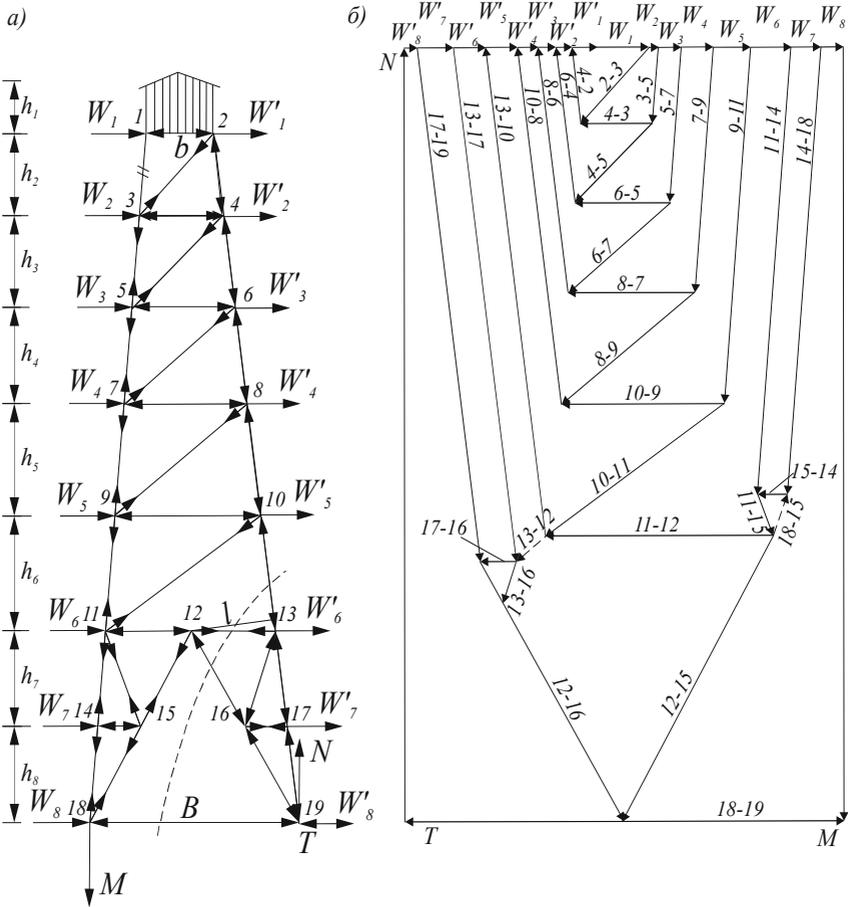


Рис. 5. Построение диаграммы Максвелла-Кремоны: а – проекция фермы; б – собственно диаграмма

Далее построение начинается от узла, в котором сходятся не более чем два неизвестных усилия (силы), – узла 1 (стержень 1-3 нулевой по лемме 1 [9]). Построив силовой многоугольник узла 4, нужно убедиться, что в узлах 5, 6, 7 и т.д. сходятся более чем два неизвестных усилия и продолжение построения диаграммы невозможно. Для решения задачи используется метод вырезания узлов, по которому мысленно отсекается часть решетки фермы с некоторыми узлами, и составляется уравнение моментов в статике, по которому находится величина усилия и ее направление (знак). После этого продолжается построение диаграммы. В конце построения возможно несовпадение вектора усилия с положением соответствующего элемента решетки фермы в результате накопления графической ошибки (штриховая линия на рис. 5 б). Стрелки векторов при построении силового многоугольника каждого из узлов переносятся согласно правилам [9] на проекцию фермы.

4. Определение суммарных усилий в участках ног вышки, поясах и раскосах. Суммарные усилия в элементах конструкции вышки целесообразно определять в табличной форме (табл. 9) с учетом знаков деформации: плюс – растяжение, минус – сжатие.

5. Наиболее нагруженные элементы вышки проверяются на прочность: для участка ноги и пояса находят λ и $\varphi = f(\lambda)$; условие прочности участка вышки $P_p / (\varphi F_{бр}) \leq [\sigma]$; условие прочности раскоса $\sigma = P_p / F \leq [\sigma]$, где $[\sigma] = 160 \div 180$ МПа.

Затем выносится заключение о работоспособности четырехгранной металлической вышки при заданных условиях нагружения.

Таблица 9

Усилия в участках ног, поясах и раскосах вышки

Стержень	Усилие, Н			Стержень	Усилие, Н			Стержень	Усилие от ветра, Н
	от Q_0 и Q_v	от ветра	Σ		от Q_0 и Q_v	от ветра	Σ		

Участки ног				Пояса				Раскосы			
1-3				1-2				3-2			
3-5				3-4				5-4			
...						

Пример. Определить усилия, возникающие в элементах четырехгранной металлической вышки от полезной нагрузки $Q_0 = 180$ кН (18 т), собственного веса $Q_B = 93$ кН и ветровой нагрузки, соответствующей скоростному напору ветра $p_0 = 1000$ Па. Геометрические размеры проекции расчетной грани вышки: $h_1 = 1,6$ м; $h_2 = 2$ м; $h_3 = 2,5$ м; $h_4 = 2,5$ м; $h_5 = 3$ м; $h_6 = 3$ м; $h_7 = 2,5$ м; $h_8 = 2,5$ м; ширина верхнего основания $b = 1,6$ м; ширина нижнего основания $B = 5,4$ м; высота вышки $H = 18$ м; диаметр и толщина стенки ног вышки соответственно 102 и 6 мм; диаметр и толщина стенки поясов вышки 102 и 6 мм (две нижних секции), 60 и 5 мм (остальные); диаметр раскосов 24 мм (две нижних секции за исключением ворот) и 20 мм (остальные).

Решение. 1. Усилия в элементах вышки от Q_0 :

$$\gamma = \arctg[\sqrt{2} \cdot H / (B - b)] = \arctg[\sqrt{2} \cdot 18 / (5,4 - 1,6)] = 81,5^\circ;$$

$$P_1 = Q_0 / (4 \sin \gamma) = 180 / (4 \sin 81,5^\circ) = 46 \text{ кН};$$

$$P_3 = Q_0 \operatorname{ctg} \gamma / (4\sqrt{2}) = 180 \cdot \operatorname{ctg} 81,5^\circ / (4\sqrt{2}) = 4,8 \text{ кН};$$

$$P_3 = 4,8 \text{ кН}.$$

2. Усилия в элементах вышки от Q_B вычислим по соотношению $q = Q_B / S$. Тогда получим:

$$S = 4(B+b)H/2 + 4bh_1 = 4(5,4+1,6)18/2 + 4 \cdot 1,6 \cdot 1,6 = 262,2 \text{ м}^2;$$

$$q = 9,3 \cdot 10^3 / 262,2 = 35,46 \text{ даН/м}^2;$$

$$S_\phi = 4bh_1 = 4 \cdot 1,6 \cdot 1,6 = 10,24 \text{ м}^2;$$

$$Q_\phi = qS_\phi = 35,46 \cdot 10,24 = 363 \text{ даН};$$

$$S_2 = 4(b_2 + h_2 t)h_2 = 4(1,6 + 2 \cdot 0,106)2 = 14,5 \text{ м}^2,$$

где $t = \text{ctgarctg}2H/(B - b) = \text{ctgarctg}2 \cdot 18/(5,4 - 1,6) = 0,106$;

$$Q_2 = qS_2 = 35,46 \cdot 14,5 = 514 \text{ даН};$$

$$S_3 = 4(b_3 + h_3 t)h_3 = 4(2,02 + 2,5 \cdot 0,106)2,5 = 22,8 \text{ м}^2,$$

где $b_3 = b_2 + 2h_2 t = 1,6 + 2 \cdot 2 \cdot 0,106 = 2,02 \text{ м}$;

$$Q_3 = qS_3 = 35,46 \cdot 22,8 = 810 \text{ даН};$$

$$S_4 = 4(b_4 + h_4 t)h_4 = 4(2,55 + 2,5 \cdot 0,106)2,5 = 28 \text{ м}^2,$$

где $b_4 = b_3 + 2h_3 t = 2,02 + 2 \cdot 2,5 \cdot 0,106 = 2,55 \text{ м}$;

$$Q_4 = qS_4 = 35,46 \cdot 28 = 998 \text{ даН};$$

$$S_5 = 4(b_5 + h_5 t)h_5 = 4(3,08 + 3 \cdot 0,106)3 = 40,8 \text{ м}^2,$$

где $b_5 = b_4 + 2h_4 t = 2,55 + 2 \cdot 2,5 \cdot 0,106 = 3,08 \text{ м}$;

$$Q_5 = qS_5 = 35,46 \cdot 40,8 = 1446 \text{ даН};$$

$$S_6 = 4(b_6 + h_6 t)h_6 = 4(3,7 + 3 \cdot 0,106)3 = 48,2 \text{ м}^2,$$

где $b_6 = b_5 + 2h_5 t = 3,08 + 2 \cdot 3 \cdot 0,106 = 3,7 \text{ м}$;

$$Q_6 = qS_6 = 35,46 \cdot 48,2 = 1710 \text{ даН};$$

$$S_7 = 4(b_7 + h_7 t)h_7 = 4(4,3 + 2,5 \cdot 0,106)2,5 = 45,6 \text{ м}^2,$$

где $b_7 = b_6 + 2h_6 t = 3,7 + 2 \cdot 3 \cdot 0,106 = 4,3 \text{ м}$;

$$Q_7 = qS_7 = 35,46 \cdot 45,6 = 1619 \text{ даН};$$

$$S_8 = 4(b_8 + h_8 t)h_8 = 4(4,83 + 2,5 \cdot 0,106)2,5 = 51 \text{ м}^2,$$

где $b_8 = b_7 + 2h_7 t = 4,3 + 2 \cdot 2,5 \cdot 0,106 = 4,83 \text{ м}$;

$$Q_8 = qS_8 = 35,46 \cdot 51 = 1807 \text{ даН}.$$

Таким образом:

$$\sum_{i=1}^8 S_i = 261 \text{ м}^2; \quad \sum_{i=1}^8 Q_i = 93 \text{ кН.}$$

Нагрузки в узлах секций:

$$P_B^I = Q_\phi / 4 = 363 / 4 = 90,8 \text{ даН;}$$

$$P_B^{II} = (Q_\phi + Q_2) / 4 = (363 + 514) / 4 = 219 \text{ даН;}$$

$$P_B^{III} = (Q_\phi + Q_2 + Q_3) / 4 = (363 + 514 + 810) / 4 = 421,8 \text{ даН;}$$

$$P_B^{IV} = (Q_\phi + Q_2 + Q_3 + Q_4) / 4 = (1687 + 998) / 4 = 671 \text{ даН;}$$

$$P_B^V = (Q_\phi + Q_2 + \dots + Q_5) / 4 = (2685 + 1446) / 4 = 1032,8 \text{ даН;}$$

$$P_B^{VI} = (Q_\phi + Q_2 + \dots + Q_6) / 4 = (4131 + 1710) / 4 = 1460 \text{ даН;}$$

$$P_B^{VII} = (Q_\phi + Q_2 + \dots + Q_7) / 4 = (5841 + 1619) / 4 = 1865 \text{ даН;}$$

$$P_B^{VIII} = (Q_\phi + Q_2 + \dots + Q_8) / 4 = (7460 + 1807) / 4 = 2317 \text{ даН.}$$

Результаты расчетов удобно представить в табличном виде (табл. 10).

Таблица 10

Вес секций и нагрузка в узлах от Q_B

Секция	Площадь боковой поверхности секции, м ²	Вес секции, даН	Нагрузка в узлах секции, даН
I	10,24	363	90,8
II	14,50	514	219,0
III	22,80	810	421,8
IV	28,00	998	671,0
V	40,80	1446	1032,8
VI	48,20	1710	1460,0
VII	45,60	1619	1865,0
VIII	51,00	1807	2317,0
Σ	261,00	9267	—

Усилия в участках ног вышки:

$$P_H^I = (Q_0/4 + P_B^I)/\sin\gamma = (4500 + 90,8)/\sin 81,5^\circ = 4642 \text{ даН};$$

$$P_H^{II} = (Q_0/4 + P_B^{II})/\sin\gamma = (4500 + 219)/1,011 = 4771 \text{ даН};$$

$$P_H^{III} = (4500 + 421,8)/1,011 = 4976 \text{ даН};$$

$$P_H^{IV} = (4500 + 671)/1,011 = 5228 \text{ даН};$$

$$P_H^V = (4500 + 1032,8)/1,011 = 5594 \text{ даН};$$

$$P_H^{VI} = (4500 + 1460)/1,011 = 6026 \text{ даН};$$

$$P_H^{VII} = (4500 + 1865)/1,011 = 6435 \text{ даН}.$$

Усилия в поясах ($P_{\Pi}^I, P_{\Pi}^{II}, \dots, P_{\Pi}^{VII}$ – усилия сжатия;
 P_{Π}^{VIII} – усилия растяжения):

$$P_{\Pi}^I = (Q_0/4 + P_B^I)ctg\gamma/\sqrt{2} = (4500 + 90,8) \cdot 0,106 = 485 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{II} = P_B^{II}ctg\gamma/\sqrt{2} = 219 \cdot 0,106 = 23 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{III} = P_B^{III}ctg\gamma/\sqrt{2} = 421,8 \cdot 0,106 = 44,7 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{IV} = P_B^{IV}ctg\gamma/\sqrt{2} = 671 \cdot 0,106 = 71 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^V = P_B^Vctg\gamma/\sqrt{2} = 1032,8 \cdot 0,106 = 110 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{VI} = P_B^{VI}ctg\gamma/\sqrt{2} = 1460 \cdot 0,106 = 155 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{VII} = P_B^{VII}ctg\gamma/\sqrt{2} = 1865 \cdot 0,106 = 198 \text{ даН};$$

$$P_{\Pi}^{VIII} = (Q_0/4 + P_B^{VIII})ctg\gamma/\sqrt{2} = (4500 + 1865) \cdot 0,106 = 675 \text{ даН}.$$

Таким образом, усилия в поясах и участках ног вышки от Q_0 и Q_B можно занести в таблицу 11.

Таблица 11

Усилия в поясах и участках ног вышки от Q_0 и Q_B

Узел	1	3	5	7	9	11	14
Усилия в участках ног, даН	4642	4771	4976	5228	5594	6026	6435
Усилия в поясах, даН	485	23	44,7	71	110	155	198

3. Усилия в стержнях вышки от ветровой нагрузки рассчитываем в следующей последовательности:

1) Расчетные площади панелей, относящиеся к соответствующим узлам:

$$F_{\phi} = bh_1/2 = 1,6 \cdot 1,6/2 = 1,28 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = (3b+b_3)h_2/16 = (3 \cdot 1,6 + 2,02)2/16 = 0,85 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = (b_2 + 2b_3 + b_4)(h_2 + h_3)/16 = \\ = (1,6 + 2 \cdot 2,02 + 2,55)(2 + 2,5)/16 = 2,3 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = (b_3 + 2b_4 + b_5)(h_3 + h_4)/16 = \\ = (2,02 + 2 \cdot 2,55 + 3,08)(2,5 + 2,5)/16 = 3,2 \text{ м}^2;$$

$$F_4 = (b_4 + 2b_5 + b_6)(h_4 + h_5)/16 = \\ = (2,55 + 2 \cdot 3,08 + 3,7)(2,5 + 3)/16 = 4,3 \text{ м}^2;$$

$$F_5 = (b_5 + 2b_6 + b_7)(h_5 + h_6)/16 = \\ = (3,08 + 2 \cdot 3,7 + 4,3)(3 + 3)/16 = 5,5 \text{ м}^2;$$

$$F_6 = (b_6 + 2b_7 + b_8)(h_6 + h_7)/16 = \\ = (3,7 + 2 \cdot 4,3 + 4,83)(3 + 2,5)/16 = 5,9 \text{ м}^2;$$

$$F_7 = (b_7 + 2b_8 + b_9)(h_7 + h_8)/16 = \\ = (4,3 + 2 \cdot 4,83 + 5,4)(2,5 + 2,5)/16 = 6,0 \text{ м}^2;$$

$$F_8 = (b_8 + 3b_9)h_8/16 = (4,83 + 3 \cdot 5,4)2,5/16 = 3,3 \text{ м}^2.$$

2) Коэффициент $n = 1$ для панелей V-VIII и $n = 1,25$ для панелей I-V.

3) Приведённая масса:

$$M_{\Pi} = M_{\text{к}} + 0,236(M + M_{\text{с}}) = 300 + 0,236(9300 + 6600) = \\ = 4052 \text{ даН} \approx 413 \text{ даН} \cdot \text{с}^2/\text{м},$$

где $M_{\text{к}} = 300 \text{ даН}$; $M = 9300 \text{ даН}$; $M_{\text{с}} = qL = 4,4 \cdot 1500 = 6600 \text{ даН}$ (здесь q – вес 1 м бурильных труб диаметром 42 мм; L – принимаемая глубина скважины, м).

Осевой момент инерции для средней части конструкции вышки:

$$I = I_x = I_y = 4I_0 + Fa^2 = 4 \cdot 18 \cdot 10^{-7} + 18 \cdot 10^{-4} \cdot 2,9^2 = 0,015 \text{ м}^4,$$

где $I_0 = \pi(d_1^4 - d_2^4)/64 = 3,14(0,102^4 - 0,09^4)/64 = 18 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$;
 $F = \pi(d_1^2 - d_2^2)/4 = 3,14(0,102^2 - 0,09^2)/4 = 18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $a = 2,9 \text{ м}$
на высоте $2/3 H$.

Период свободных колебаний вышки:

$$T = 3,63 \sqrt{H^3 M_{II} / (EI)}$$

$$= 3,63 \sqrt{18^3 \cdot 413 / (2,1 \cdot 10^{10} \cdot 0,015)} = 0,32 \text{ с},$$

где $E = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ даН/м}^2$.

4) Коэффициенты $\xi \approx 0,66$ и $\beta = 1 + 0,12 \cdot 0,66 = 1,08$.

5) Аэродинамический коэффициент c_a для участка ноги, пояса и раскоса вышки получим по значению $p_0 n d^2$: для панелей V–VIII соответственно $p_0 n d^2 = 1000 \cdot 1 \cdot 0,102^2 = 10,4 \text{ Н}$, $1000 \cdot 1 \cdot 0,06^2 = 3,6 \text{ Н}$ и $1000 \cdot 1 \cdot 0,02^2 = 0,4 \text{ Н}$; для панелей I–V соответственно $p_0 n d^2 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 0,102^2 = 13 \text{ Н}$, $1000 \cdot 1,25 \cdot 0,06^2 = 4,5 \text{ Н}$ и $1000 \cdot 1,25 \cdot 0,02^2 = 0,5 \text{ Н}$. Таким образом, принимаем максимальное $c_a \approx 1,0$.

6) Коэффициент ослабления ветра m_3 при $\varphi = 0,2$ найдем, вычислив отношение b_1/h_0 для каждого значения F_n :

для F_1 $b_1/h_0 = (3b + b_3)/(4h_2) = (3 \cdot 1,6 + 2,02)/(4 \cdot 2) = 0,85$; $m_3^I = 0,80$;

для F_2 $b_1/h_0 = (b_2 + 2b_3 + b_4)/[4(h_2 + h_3)] = (1,6 + 2 \cdot 2,02 + 2,55)/[4(2 + 2,5)] = 0,46$; $m_3^{II} = 0,75$;

для F_3 $b_1/h_0 = (b_3 + 2b_4 + b_5)/[4(h_3 + h_4)] = (2,02 + 2 \cdot 2,55 + 3,08)/[4(2,5 + 2,5)] = 0,51$; $m_3^{III} = 0,75$;

для F_4 $b_1/h_0 = (b_4 + 2b_5 + b_6)/[4(h_4 + h_5)] = (2,55 + 2 \cdot 3,08 + 3,7)/[4(2,5 + 3)] = 0,56$; $m_3^{IV} = 0,76$;

для F_5 $b_1/h_0 = (b_5 + 2b_6 + b_7)/[4(h_5 + h_6)] = (3,02 + 2 \cdot 3,7 + 4,3)/[4(3 + 3)] = 0,62$; $m_3^V = 0,77$;

для F_6 $b_1/h_0=(b_6+2b_7+b_8)/[4(h_6+h_7)]=(3,7+2\cdot4,3+4,83)/[4(3+2,5)] = 0,78$; $m_3^{VI} = 0,78$;

для F_7 $b_1/h_0=(b_7+2b_8+b_9)/[4(h_7+h_8)]=(4,3+2\cdot4,83+5,4)/[4(2,5+2,5)] = 1,0$; $m_3^{VII} = 0,81$;

для F_8 $b_1/h_0=(b_8+3b_9)/(4h_8)=(4,83+3\cdot5,4)/(4\cdot2,5)=2,1$; $m_3^{VIII} = 0,88$.

Таким образом, силы ветра, действующие на узлы вышки, будут равны:

с наветренной стороны:

$$W_1 = p_0 n \beta_0,8 F_{\phi} + p_0 n \beta c_a \varphi F_1 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,8 \times \\ \times 1,28 + 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 0,85 = 1612 \text{ Н};$$

$$W_2 = p_0 n \beta c_a \varphi F_2 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 2,3 = 621 \text{ Н};$$

$$W_3 = p_0 n \beta c_a \varphi F_3 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 3,2 = 864 \text{ Н};$$

$$W_4 = p_0 n \beta c_a \varphi F_4 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 4,3 = 1161 \text{ Н};$$

$$W_5 = p_0 n \beta c_a \varphi F_5 = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 5,5 = 1485 \text{ Н};$$

$$W_6 = p_0 n \beta c_a \varphi F_6 = 1000 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 5,9 = 1274 \text{ Н};$$

$$W_7 = p_0 n \beta c_a \varphi F_7 = 1000 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 6 = 1296 \text{ Н};$$

$$W_8 = p_0 n \beta c_a \varphi F_8 = 1000 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 3,3 = 713 \text{ Н};$$

с заветренной стороны:

$$W_1 = p_0 n \beta_0,6 F_{\phi} + p_0 n \beta c_a \varphi F_1 m_3^I = 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,6 \cdot 1,28 + \\ + 1000 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = 1220 \text{ Н};$$

$$W_2 = p_0 n \beta c_a \varphi F_2 m_3^{II} = 621 \cdot 0,75 = 466 \text{ Н};$$

$$W_3 = p_0 n \beta c_a \varphi F_3 m_3^{III} = 864 \cdot 0,75 = 648 \text{ Н};$$

$$W_4 = p_0 n \beta c_a \varphi F_4 m_3^{IV} = 1161 \cdot 0,76 = 882 \text{ Н};$$

$$W_5 = p_0 n \beta c_a \varphi F_5 m_3^V = 1485 \cdot 0,77 = 1143 \text{ Н};$$

$$W_6 = p_0 n \beta c_a \varphi F_6 m_3^{VI} = 1274 \cdot 0,78 = 994 \text{ Н};$$

$$W_7 = p_0 n \beta c_a \varphi F_7 m_3^{VII} = 1296 \cdot 0,81 = 1050 \text{ Н};$$

$$W_8 = p_0 n \beta c_a \varphi F_8 m_3^{VIII} = 713 \cdot 0,88 = 627 \text{ Н}.$$

4. Построение диаграммы Максвелла-Кремоны проведем следующим образом. Значение $c = 2y - 3 = 2 \cdot 19 - 3 = 35$ совпадает с числом стержней на чертеже, визуальный анализ не обнаруживает «лишних» стержней и, следовательно, построение диаграммы возможно.

Определим величину реакций M , N и T :

$$T = \sum_{i=1}^8 (W_i + W_i) = 161 + 122 + 62 + 47 + 86 + 65 + 116 + 88 + 148 + 114 + 127 + 99 + 130 + 105 + 71 + 63 = 1604 \text{ даН};$$

$$M = N = \left[(W_1 + W_1) \sum_{i=2}^n h_i + (W_2 + W_2) \sum_{i=3}^n h_i + \dots + (W_{n-1} + W_{n-1}) h_n \right] / B =$$

$$= [(161 + 122)(2 + 2,5 + 2,5 + 3 + 3 + 2,5 + 2,5) + (62 + 47)(2,5 + 2,5 + 3 + 3 + 2,5 + 2,5) + (86 + 65)(2,5 + 3 + 3 + 2,5 + 2,5) + (116 + 88)(3 + 3 + 2,5 + 2,5) + (148 + 114)(3 + 2,5 + 2,5) + (127 + 99)(2,5 + 2,5) + (130 + 105)2,5] / 5,4 = 2766 \text{ даН}.$$

Строим диаграмму до узла 10. Затем для нахождения величины усилия F_{18-19} составим уравнение моментов «вырезанной» части вышки, ее расчетной грани относительно узла 12:

$$\Sigma M_{12} = F_{10-13} l - W_7 h_7 - NB/2 - W_8 (h_7 + h_8) + T (h_7 + h_8) - F_{18-19} (h_7 + h_8) = 0;$$

$$1850 \cdot 2,2 - 105 \cdot 2,5 - 2766 \cdot 5,4 / 2 - 63(2,5 + 2,5) + \\ + 1604(2,5 + 2,5) - F_{18-19}(2,5 + 2,5) = 0; F_{18-19} = 809 \text{ даН.}$$

Суммарные усилия в элементах конструкции вышки рассчитаем, заполняя таблицу 12.

5. Проверим на прочность наиболее нагруженные элементы вышки (участок ноги, пояс и раскос):

1) Из расчетов (табл. 12) следует, что наиболее нагруженным является участок ноги 17-19 с продольным сжатием усилием 8235 даН. Произведем расчеты для данного элемента вышки:

$$l_{17-19} = h_8 / \sin \arctg[2H / (B - b)] = \\ = 2,5 / \sin \arctg[2 \cdot 18 / (5,4 - 1,6)] = 2,51 \text{ м;}$$

$$\lambda = l_{17-19} / i = l_{17-19} \cdot 4 / \sqrt{D_1^2 + D_2^2} = \\ = 2,51 \cdot 4 / \sqrt{0,102^2 + 0,09^2} = 73,8;$$

$$\varphi = f(\lambda) = 0,8;$$

$$F_{17-19} / (\varphi F_{6p}) = F_{17-19} \cdot 4 / [\varphi \pi (D_1^2 + D_2^2)] = \\ = 8235 \cdot 4 / [0,8 \cdot 3,14(10,2^2 - 9^2)] = 569 < [\sigma] = 1600 \text{ даН/см}^2.$$

Наиболее нагруженный участок ноги вышки удовлетворяет условиям прочности.

2) Наиболее нагруженным является пояс 9-10 (усилие в поясе 11-12 хотя и больше по абсолютной величине, но стержень его большего сечения и значительно короче, чем стержень 9-10): сила продольного сжатия 710 даН. Произведем расчеты для данного элемента вышки:

$$l_{9-10} = 3,7 \text{ м;}$$

$$\lambda = l_{9-10} \cdot 4 / \sqrt{D_1^2 + D_2^2} = 3,7 \cdot 4 / \sqrt{0,06^2 + 0,05^2} = 190;$$

$$\varphi = f(\lambda) = 0,21;$$

$$\begin{aligned} F_{9-10}/(\varphi F_{6p}) &= F_{9-10} \cdot 4/[\varphi \pi(D_1^2 + D_2^2)] = \\ &= 710 \cdot 4/[0,21 \cdot 3,14(6^2 - 5^2)] = 392 < [\sigma] = 1600 \text{ даН/см}^2. \end{aligned}$$

Следовательно, наиболее нагруженный пояс удовлетворяет условиям прочности.

3) Наиболее нагруженным является раскос 11-10 с силой растяжения 820 даН. Раскосы 12-16 и 16-19 хотя и нагружены большими по величине силами сжатия, но изготовлены из труб большего сечения и меньшей длины. Проверка на прочность наиболее нагруженного пояса показала, что приблизительно при таких же условиях нагружения имеет место большой запас прочности. Произведем расчет для данного элемента вышки:

$$F_{11-10} \cdot 4 / (\pi D^2) = 820 \cdot 4 / (3,14 \cdot 2^2) = 261 < [\sigma] = 1600 \text{ даН/см}^2.$$

Таким образом, полученное значение удовлетворяет условию $F_{11-10} / F_{бр} < [\sigma]$.

Проверка наиболее нагруженных элементов вышки: участка ноги, пояса и раскоса – при заданных начальных условиях подтвердила ее достаточную прочность и работоспособность.

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

Лабораторная работа 3 ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ БУРОВЫХ МАЧТ

Цель работы. Освоение методики по определению нагрузок, действующих на основные элементы конструкции мачт (А-образной, трубчатой с креплением подкоса под кронблок и с отклоняющим рычагом, призматической).

Задание

1. В соответствии с исходными данными рассчитать нагрузки, действующие на основные элементы конструкции мачт.

2. Произвести проверку допустимости возникающих в конструкциях мачт напряжений и запас их прочности.

3. На основании расчётных значений нагрузок подобрать профиль и вычислить площадь поперечного сечения основных конструктивных элементов мачт.

Начальные условия

Нагрузка на кронблок мачты, длина участков трубчатого ствола мачты, подкосов, углы между подкосом и стволом, между ногой мачты и линией, соединяющей основания ног, размеры наголовника и опорного сечения призматической мачты.

Общие положения

Буровые мачты используются при строительстве скважин разной глубины с углами наклона $90-70^\circ$ к горизонту. При равной с башенными вышками высоте и грузоподъемности у них меньшая металлоемкость, и они имеют меньшее число разъемных деталей. Применение мачт вместо вышек позволяет снизить затраты времени на монтажно-демонтажные работы с 8 до 2 % от времени на собственно бурение скважины, а также уменьшает транспортные и другие эксплуатационные расходы.

По конструкции мачты могут быть призматическими, пирамидообразными, А-образными и шестовыми.

Порядок выполнения работы

При расчете А-образной мачты (рис. 6) по совокупной нагрузке на кронблок мачты R определяют ее составляющие в плоскости ног мачты S и подкосов T путем разложения R по принципу параллелограмма.

Составляющие нагрузки S в плоскости мачты:

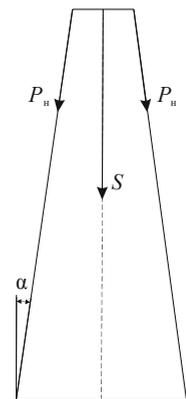


Рис. 6. Конструктивная схема А-образной мачты

$$P_1 = P_2 = S / (2 \cos \alpha). \quad (44)$$

Напряжения в элементах ног мачты рассчитывают в соответствии с их конструкцией и сравнивают с допускаемым напряжением.

Аналогично определяют растягивающие усилия в подкосах P_1 и P_2 :

$$P_1 = P_2 = T / (2 \cos \alpha_1), \quad (45)$$

где α_1 – угол между подкосом и линией, соединяющей основания подкосов.

Ноги мачты рассчитывают на продольный изгиб по формуле Эйлера или по ТУ (см. работу 1) с учетом конфигурации их сечения. Площадь сечения подкосов устанавливают по условию простого растяжения.

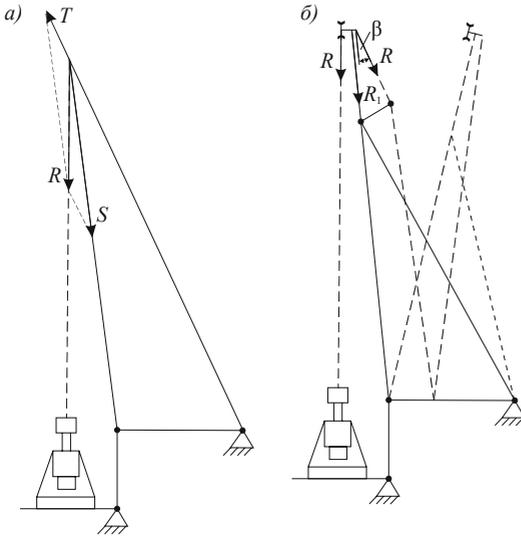


Рис. 7. Конструктивные схемы трубчатых мачт: *а* – с креплением подкоса под кронблок; *б* – с отклоняющим рычагом

Трубчатая мачта с креплением подкоса под кронблок рассчитывается аналогично А-образной мачте с той лишь разницей, что несущим элементом конструкции является трубчатый ствол мачты, нагрузка S на который определяется в зависимости от формы параллелограмма, образуемого силами R , T и S (рис.7, *а*). По растягивающему усилию T

определяется сечение трубчатого подкоса.

Трубчатая мачта с отклоняющим рычагом (рис.7, б), благодаря конструкции воспринимает нагрузку R таким образом, что результирующая нагрузка на несущий ствол мачты R_1 , равная $2R$, не вызывает изгибающего момента. Таким образом, труба мачты рассчитывается как стержень с промежуточной опорой в точке O на продольный изгиб по формуле:

$$P_{кр} = R_1 = \eta EI/l^2 = \pi^2 EI/(\mu l^2), \quad (46)$$

где l – высота мачты. Коэффициенты критической силы и приведенной длины η и μ находят по таблице [7].

Расчет призматических мачт (рис. 8) производится в со-

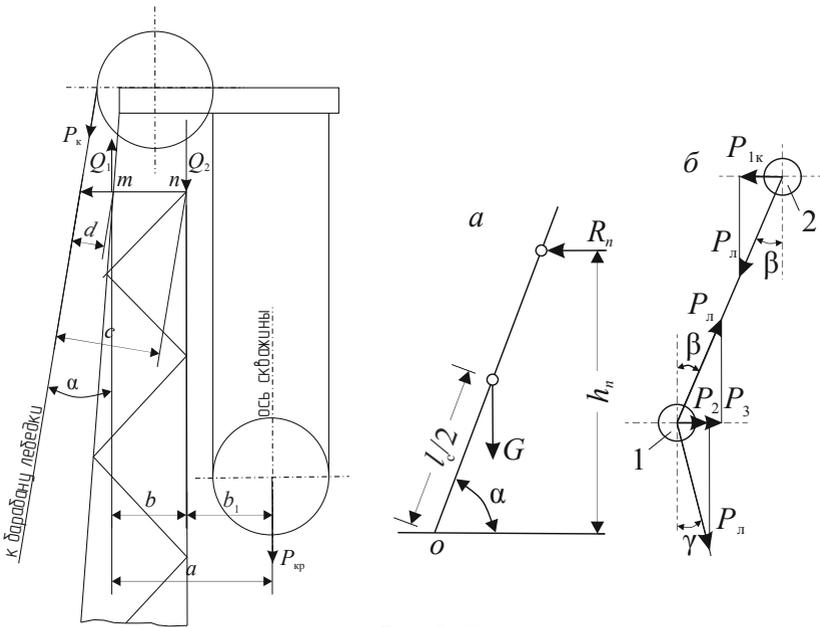


Рис. 9. Схемы горизонтальных нагрузок от действия веса пакета свечей (а) и натяжения лебедочной ветви каната (б)

Рис. 8. Схема нагружения призматической мачты

ответствии со схемой нагружения. При этом действие наголовника на опорное сечение мачты рассматривается как действие суммы моментов сил P_k и $P_{кр}$, уравновешиваемое силами реакции боковых граней четырехугольной мачты. Приравнявая нулю сумму моментов сил P_k и $P_{кр}$ относительно точек m и n и сумму их проекций на горизонталь, находят величину нагрузок, действующих на каждую боковую грань мачты:

$$Q_1 = (P_{кр}b_1 - P_k c) / (2b); \quad (47)$$

$$Q_2 = (P_{кр}a - P_k d) / (2b); \quad (48)$$

$$T = P_k \sin \alpha / 2. \quad (49)$$

Горизонтальные нагрузки, действующие на мачту, вызывают опрокидывающий момент, компенсируемый подкосами и частично растяжками (рис. 9, а). Комплект свечей создает на палец или свечеприемник нагрузку, горизонтальная составляющая P_r которой равна по величине и противоположна по направлению соответствующей реакции R_n :

$$P_r = Gl_c \cos \alpha / (2h_n). \quad (50)$$

Горизонтальные составляющие натяжения лебедочной ветви каната действуют на мачты в местах крепления кронблока 2 и оттяжного ролика 1 (рис. 9, б):

$$P_{1к} = P_l \sin \beta; \quad (51)$$

$$P_{2к} = P_2 + P_3 = P_l (\sin \beta + \sin \gamma), \quad (52)$$

где P_l – натяжение лебедочной ветви каната.

Пример 1. Определить нагрузку на ствол трубчатой мачты с отклоняющим рычагом (см. рис. 7, б) и рассчитать коэффициент запаса устойчивости для следующих условий: рабочая высота мачты 25 м, подкос на высоте 16 м, ствол мачты из труб 570×7 мм, нагрузка на крюке 125 кН.

Решение. Результирующая нагрузка на ствол мачты:

$$R_1 = 2R = 2 \cdot 125 = 250 \text{ кН},$$

где R – нагрузка на крюке.

Критическая нагрузка на ствол мачты:

$$P_{\text{кр}} = \eta EI / l^2 = 7 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} / 25^2 = 1153363 \approx 1153 \text{ кН},$$

где $I = \pi(D_1^4 - D_2^4) / 64 = 3,14(0,57^4 - 0,556^4) / 64 = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4$;
 D_1 и D_2 – соответственно наружный и внутренний диаметры
трубчатой мачты; $\eta = 7$, при соотношении $b/l = 16/25$ и
схеме нагружения 1 [7].

Коэффициент запаса устойчивости:

$$k_y = P_{\text{кр}} / R_1 = 1153 / 250 = 4,6.$$

Пример 2. Рассчитать величину сил Q_1 , Q_2 и T , действующих на грань четырехгранной призматической мачты (см. рис. 8), от нагрузки на крюке $P_{\text{кр}}$ и натяжения в рабочей ветви каната $P_{\text{к}}$. Начальные условия: $P_{\text{кр}} = 25 \text{ кН}$; $P_{\text{к}} = 12,5 \text{ кН}$; $c = 554 \text{ мм}$, $b = 410 \text{ мм}$, $a = 820 \text{ мм}$, $b_1 = 410 \text{ мм}$, $d = 84 \text{ мм}$, $\alpha = 9,45^\circ$.

$$Q_1 = (P_{\text{кр}} b_1 - P_{\text{к}} c) / (2b) = (25 \cdot 410 - 12,5 \cdot 554) / (2 \cdot 410) = 4,05 \text{ кН};$$

$$Q_2 = (P_{\text{кр}} a - P_{\text{к}} d) / (2b) = (25 \cdot 820 - 12,5 \cdot 84) / (2 \cdot 410) = 23,7 \text{ кН};$$

$$T = P_{\text{к}} \sin \alpha / 2 = 12,5 \cdot 0,16 / 2 = 1 \text{ кН}.$$

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

2. РАСЧЕТ БУРИЛЬНЫХ И ОБСАДНЫХ ТРУБ

Лабораторная работа 4 РАСЧЕТЫ КОЛОННЫ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ, ОЦЕНКА ИХ ПРОЧНОСТИ

Цель работы. Освоение методики расчёта по определению напряжений, действующих в колонне бурильных труб (КБТ). Оценка прочности и работы колонны.

Задание

1. В соответствии с исходными данными определить напряжения у устья скважины, в растянутой части, в нейтральном сечении и в сжатой части КБТ при оптимальных условиях бурения.

2. Оценить прочность в указанных частях колонны.

3. Дать общую оценку работы КБТ.

Начальные условия

Тип установки, бурового станка с заданными частотой вращения шпинделя, мощностью двигателя, КПД передачи от двигателя к шпинделю станка, коэффициентом перегрузки двигателя; глубина скважины, ее диаметр, диаметр КБТ, осевая нагрузка на забой, тип коронки, длина скоса отклоняющего клина, угол наклона скважины.

Общие положения

КБТ предназначена для создания осевой нагрузки, передачи крутящего момента и подвода очистного агента с поверхности на забой. Кроме того, бурильная колонна служит каналом для подъема кернового материала или керноприемных устройств и сменного породоразрушающего инструмента, а при проходке скважин в неустойчивых горных породах также может выполнять функцию обсадной колонны, предохраняющей стенки скважины от обрушения. В некоторых случаях при проведении специальных работ или исследований в стволе

скважины КБТ играет роль вспомогательного инструмента, с помощью которого в скважину опускают аппаратуру и различные материалы.

Порядок выполнения работы

1. Определяется напряжение растяжения в сечении КБТ у устья скважины:

а) при подъеме КБТ:

$$\sigma'_p = 1,2k\varphi L(\gamma - \gamma_{ж}) \leq [\sigma], \quad (53)$$

где 1,2 – коэффициент, учитывающий силы сопротивления при подъеме; k – коэффициент, учитывающий вес замковых соединений, $k = 1,05$ при ниппельном соединении, $k = 1,10$ при муфтово-замковом; φ – коэффициент, учитывающий ослабление КБТ в резьбовых соединениях, $\varphi = 1,30 \div 1,40$ при ниппельном соединении, $\varphi = 1,15 \div 1,20$ при муфтово-замковом; L – длина КБТ, равная глубине скважины H_c ; γ и $\gamma_{ж}$ – соответственно удельный вес стали и промывочной жидкости;

б) при бурении:

$$\sigma''_p = k\varphi(L - l)(\gamma - \gamma_{ж}) \leq [\sigma], \quad (54)$$

где l – длина сжатой части КБТ:

$$l = C/[kq(l - \gamma_{ж}/\gamma)], \quad (55)$$

где C – осевая нагрузка на забой; q – вес 1 м бурильных труб (табл. 13).

Таблица 13

Вес q типового ряда бурильных труб

d/d_1 , мм/мм	50/39	54/45	68/59
q , даН/м	6,04	5,49	7,04

2. Рассчитываются напряжения кручения в сечении КБТ у устья скважины τ и проверяются по условию:

$$\tau = M_k/W \leq [\tau], \quad (56)$$

где $[\tau] = 100$ МПа, M_k – крутящий момент, действующий в сечении КБТ, даН·см; W – момент сопротивления кручению:

$$W = \pi(d^4 - d_1^4)/(16d), \quad (57)$$

где d и d_1 – соответственно наружный и внутренний диаметры бурильных труб.

Крутящий момент вычисляется по формуле:

$$M_k = 97400N_y/n, \quad (58)$$

где n – частота вращения, мин⁻¹; N_y – мощность, развиваемая КБТ при вращении в устье скважины, кВт:

$$N_y = N + N_T + N_p = N + (1,2 \div 1,3)N_T, \quad (59)$$

где N – мощность, развиваемая при холостом вращении КБТ, кВт; N_T – мощность, развиваемая при преодолении трения коронки о забой, кВт; N_p – мощность, развиваемая при разрушении породы, кВт, $N_p = (0,2 \div 0,3)N_T$.

Мощность, развиваемая при холостом вращении КБТ, вычисляется по следующей формуле:

$$N = 2 \cdot 10^{-7} \varphi \lambda_y L D_c (D_c - d) q n^3, \quad (60)$$

где φ – коэффициент динамического трения; λ_y – поправочный коэффициент, учитывающий влияние упругих сил и собственного веса КБТ при вращении; D_c – диаметр скважины, м.

Мощность, развиваемая при преодолении трения коронки о забой можно вычислить, воспользовавшись формулой:

$$N_T = 0,0098 F_g \mu_0 \omega R_n, \quad (61)$$

где F_g – усилие подачи, даН; μ_0 – коэффициент трения породоразрушающего инструмента по горной породе; ω – угловая скорость вращения КБТ, $\omega = \pi n/30$, с⁻¹; R_n – средний радиус коронки, м, $R_n = (D + D_1)/4$.

Усилие подачи вычисляется по формуле:

$$F_g = bqL_c(1 - \gamma_{ж}/\gamma), \quad (62)$$

где b – коэффициент, учитывающий влияние сил трения и гидравлического подпора.

3. Вычисляется наибольший крутящий момент, возможный при бурении в данных условиях:

$$M_{\max} = 97400N_d\eta_{п}\lambda/n, \quad (63)$$

где N_d – номинальная мощность двигателя станка (установки), кВт; $\eta_{п}$ – КПД передачи от двигателя к шпинделю станка; λ – коэффициент возможной перегрузки двигателя.

Сравнение M_{\max} с M_k позволяет сделать вывод о допустимости величины касательного напряжения, возникающего в том и другом случае.

4. Определяется суммарное напряжение в сечении КБТ у устья скважины по третьей теории прочности [9]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_p^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma], \quad (64)$$

где $[\sigma] \approx 250$ МПа для стали Д, и вычисляется запас прочности в статических условиях:

$$m_1 = \sigma_t/\sigma_{\Sigma}. \quad (65)$$

5. Определяется напряжение сжатия в нижнем сечении КБТ от собственного веса и гидростатического давления:

$$\sigma_{сж} = \sigma_1 + \sigma_2 = \varphi\{L\gamma_{ж} + C\gamma/[kq(1 - \gamma_{ж}/\gamma)]\}. \quad (66)$$

6. Вычисляется критическая длина невращающейся КБТ при продольном сжатии под действием собственного веса:

$$l_{кр} = 2,7^3\sqrt{EI/q}. \quad (67)$$

7. Определяется длина полуволны КБТ:

- длина полуволны, образующейся под действием только центробежных сил при ее вращении, в метрах:

$$l' = v/\sqrt{n}, \quad (68)$$

где $v = 20,6^4 \sqrt{I/\beta q}$; I – в см⁴; q – в даН/см; β – коэффициент, учитывающий увеличение сил инерции за счет веса ниппельных или замковых соединений и промывочной жидкости в БТ, $\beta = 1,33$ для ниппельных соединений и $\beta = 1,41$ для муфтово-замковых соединений;

- длина полуволны, образующейся под действием продольных и поперечных сил с учетом взаимодействия БТ со стенками скважины, в метрах:

$$l'' = 3,65/\omega_e \sqrt{-0,5gz + \sqrt{0,25(gz)^2 + 2,68EIg\omega_e^2/q}}, \quad (69)$$

где ω_e – переносная скорость вращения КБТ, с⁻¹ (табл. 14); $\omega_e = \omega(k_\omega - \beta)/(1 - \beta)$; k_ω – коэффициент уменьшения угловой скорости вращения ω в точках касания КБТ стенок скважины; $\beta = d/D$; z – координата расчетного участка КБТ относительно нейтрального сечения (в сжатой части со знаком плюс, в растянутой – со знаком минус), м; g – в м/с²; EI – в даН·м²; q – в даН/м.

Таблица 14

Зависимость коэффициента k_ω от частоты вращения

$n, \text{ мин}^{-1}$	< 100	100-250	250-350	350-650	650-950	950-1150
k_ω	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95

8. Определяется напряжение изгиба:

- в растянутой части КБТ (приблизительно на расстоянии 100 м от устья скважины):

$$\sigma'_н = 5,6Edf/(l'')^2, \quad (70)$$

где E – в даН/см²; d, f и l'' – в см;

- в сжатой части КБТ:

$$\sigma_{\text{н}}'' = f q z d \cos \alpha_0 / (4I), \quad (71)$$

где $\sigma_{\text{н}}''$ – в даН/см²; f – в см; q – в даН/м; z – в м; d – в см; I – в см⁴; α_0 – зенитный угол.

9. Определяется длина полуволны КБТ, образующейся под действием продольных и поперечных сил с учетом взаимодействия БТ со стенками скважины в зоне нейтрального сечения:

$$l_{\text{н}} = 3,65 / \omega_e \sqrt[4]{2,68 E I g \omega_e^2 / q}. \quad (72)$$

10. Определяется напряжение изгиба в зоне нейтрального сечения:

$$\sigma_{\text{н.н.}} = 5,6 E d f / l_{\text{н}}^2. \quad (73)$$

11. Рассчитывается запас прочности в растянутой части КБТ (приблизительно на расстоянии 100 м от устья скважины):

- по нормальным напряжениям:

$$m_{\sigma} = \sigma_{\text{т}} \sigma_{-1} / (\sigma_{\text{т}} \sigma_{\text{н}} + \sigma_{-1} \sigma_{\text{р}}), \quad (74)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала БТ (табл. 15); σ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле нагружения; $\sigma_{\text{н}}$ и $\sigma_{\text{р}}$ – напряжение изгиба и растяжения в расчетном сечении соответственно;

Таблица 15

Пределы текучести и пределы выносливости материала БТ

Материал	$\sigma_{\text{т}}$, даН/мм ²	$\tau_{\text{т}}$, даН/мм ²	$(\sigma_{-1})_{\text{н}}$, даН/мм ²	
			тела трубы	резьбовых соединений
Ст Д	38,0	19,0	6,3	3,5
Д16Т	33,0	16,5	3,7	3,1

- по касательным напряжениям:

$$m_{\tau} = \tau_{\tau}/\tau, \quad (75)$$

где τ_{τ} – предел текучести; τ – касательное напряжение в расчетном сечении;

- при сложном напряженном состоянии:

$$m_{II} = m_{\sigma}m_{\tau}/\sqrt{m_{\sigma}^2 + m_{\tau}^2}. \quad (76)$$

12. Определяется запас прочности в нейтральном сечении КБТ:

$$m_{III} = \sigma_{-1}/\sigma_{и.н.}, \quad (77)$$

Вследствие малости касательного напряжения в нейтральном сечении в расчёте им можно пренебречь.

13. Рассчитывается напряжение кручения КБТ при срыве керна:

$$\tau = D_{\kappa}^3 d \tau_{\kappa} / (d^4 - d_1^4) \leq [\tau], \quad (78)$$

где D_{κ} – диаметр керна; τ_{κ} – предел прочности керна на сдвиг, $\tau_{\kappa} = \sigma_{сж}/(10 \div 15)$; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие.

14. Определяется касательное напряжение при инерционном скручивании КБТ в результате ее внезапной остановки:

$$\tau_{и} = 12,1\omega d = (\pi n/2,5)d, \quad (79)$$

где ω – угловая скорость вращения, c^{-1} ; d – диаметр бурильной колонны, м; n – частота вращения, $мин^{-1}$.

15. Определяется допустимый угол искусственного искривления скважины с помощью клина:

$$\alpha_{\max} = 115[\sigma_{и}]L_{\kappa}/(dE), \quad (80)$$

где $[\sigma_{и}]$ – допускаемое напряжение изгиба, можно принять $[\sigma_{и}] = (\sigma_{-1})$, $даН/см^2$, L_{κ} – длина скоса клина, см; d – в см; E – в $даН/см^2$.

Действительное значение угла, определяемым длиной скоса клина L_K :

$$\alpha = \arctg(D_c/L_K), \quad (81)$$

Величину α_{\max} на участке набора кривизны L_K сравнивают с действительным значением угла α с целью подтверждения возможности использования клина с данной длиной скоса.

Пример. Рассчитать колонну бурильных труб и сделать оценку их прочности для следующих начальных условий: буровой станок ЗИФ-1200 МР с частотой вращения шпинделя 75, 136, 231, 288, 336, 414, 516, 600 мин⁻¹; $N_{\text{дв}} = 55$ кВт; $\eta = 0,8$; $\lambda_{\text{п}} = 1,75$; $H_c = 1000$ м; $D = 9$ мм; $d = 50$ мм (муфтово-замковые соединения под БТ диаметром 42 мм, расточенные); $C = 8$ кН; алмазная коронка (наиболее распространенные диаметры алмазных коронок 46/31,5; 59/44; 76/60; 93/77, где в числителе и знаменателе – диаметры коронки, внешней и внутренней соответственно, мм); $L_K = 2$ м; угол наклона скважины 90°.

Решение. 1. Напряжение растяжения в сечении КБТ у устья скважины:

- при подъеме:

$$\sigma'_p = 1,2k\varphi L(\gamma - \gamma_{\text{ж}}) = 1,2 \cdot 1,05 \cdot 1,2 \cdot 1000(7,85 - 1)10^4 = 104 \text{ МПа},$$

- при бурении:

$$\begin{aligned} \sigma''_p &= k\varphi(L-l)(\gamma - \gamma_{\text{ж}}) = \\ &= 1,05 \cdot 1,2(1000 - 144)(7,85 - 1)10^4 = 73,9 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где $l = C/[kq(1 - \gamma_{\text{ж}}/\gamma)] = 8 \cdot 10^2/[1,05 \cdot 6,04(1 - 1/7,85)] = 144$ м.

2. Напряжение кручения в сечении КБТ у устья скважины рассчитывается для оптимальных условий работы (бурения), т.е. для максимальной загрузки бурового станка. Поэтому принимается наиболее вероятное значение $n = 414$ мин⁻¹, для которого $\omega = \pi n/30 = 3,14 \cdot 414/30 = 43$ с.

Порядок вычислений:

$f = 1,2(D - d)/2 = 1,2(59 - 50)/2 = 5,4 \text{ мм} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,
где 1,2 – коэффициент разработки скважины;

$$N = 2 \cdot 10^{-7} \varphi \lambda_y L D_c (D_c - d) q n^3 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 1000 \cdot 0,0708 (0,0708 - 0,05) 6,04 \cdot 414^3 = 34,1 \text{ кВт},$$

где $D_c = 1,2D = 1,2 \cdot 0,059 = 0,0708 \text{ м}$;

$$N_T = 0,0098 F_g \mu_0 \omega R_{\text{и}} = 0,0098 \cdot 800 \cdot 0,3 \cdot 43 \cdot 0,026 = 2,6 \text{ кВт},$$

где $F_g \sim C = 800 \text{ даН}$; $R_{\text{и}} = (D - D_1)/4 = (59 + 44)/4 = 25,8 \text{ мм} \approx 0,026 \text{ м}$; D_1 – внутренний диаметр алмазной коронки;

$$N_y = N + 1,2N_T = 34,1 + 1,2 \cdot 2,6 = 37,2 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{к}} = 97400 N_y / n = 97400 \cdot 37,2 / 414 = 8752 \text{ даН} \cdot \text{см};$$

$$W = \pi(d^4 - d_1^4)/(16d) = 3,14(5^4 - 3,9^4)/(16 \cdot 5) = 15,4 \text{ см}^3;$$

$$\tau = M_{\text{к}}/W = 8752/15,4 = 568 \text{ даН/см}^2 \approx 56,8 \text{ МПа} < [\tau].$$

3. Наибольший крутящий момент, возможный при бурении в данных условиях:

$$M_{\text{max}} = 97400 \cdot 55 \cdot 0,8 \cdot 1,75/414 = 18116 \text{ даН} \cdot \text{см}.$$

Так как $M_{\text{max}}/M_{\text{к}} = 2,1$, возможное напряжение составит:

$$\tau_{\text{max}} = 56,8 \cdot 2,1 = 117,6 \text{ МПа} > [\tau].$$

Следовательно, необходимо устанавливать ограничитель момента ОМ-40.

4. Суммарное напряжение в сечении КБТ у устья скважины при нормальном процессе бурения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_p^2 + 4\tau^2} = \sqrt{73,9^2 + 4 \cdot 56,8^2} = 135,5 \text{ МПа}.$$

Запас прочности для стали марки Д:

$$m_I = \sigma_T / \sigma_\Sigma = 380 / 135,5 = 2,8.$$

5. Напряжение сжатия от собственного веса и гидростатического давления в нижнем сечении КБТ

$$\begin{aligned} \sigma_{сж} &= \varphi \{ L\gamma_{ж} + C\gamma / [kq(1 - \gamma_{ж}/\gamma)] \} = \\ &= 1,2 \{ 1000 \cdot 1 \cdot 10^{-1} + 800 \cdot 7,85 \cdot 10^{-1} / [1,05 \cdot 6,04 \times \\ &\quad \times (1 - 1/7,85)] \} = 256 \text{ даН/см}^2 \approx 25,6 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

6. Критическая длина невращающейся КБТ при продольном сжатии под действием собственного веса:

$$l_{кр} = 2,7^3 \sqrt{4056/6,04} = 23,6 \text{ м},$$

где $EI = E\pi(d^4 - d_1^4)/64 = 2,1 \cdot 10^{10} \cdot 3,14(5^4 - 3,9^4)10^{-8}/64 = 4056 \text{ даН} \cdot \text{м}^2$.

7. Длина полуволны КБТ, образующейся под действием только центробежных сил при ее вращении:

$$l' = v / \sqrt{n} = 81,1 / \sqrt{414} = 4 \text{ м},$$

где $v = 20,6^4 \sqrt{I/(\beta q)} = 20,6^4 \sqrt{19,3 \cdot 10^2 / (1,33 \cdot 6,04)} = 81,1$;
 $I = \pi(d^4 - d_1^4)/64 = 3,14(5^4 - 3,9^4)/64 = 19,3 \text{ см}^4$.

Длина полуволны КБТ, образующейся под действием продольных и поперечных сил с учетом взаимодействия БТ со стенками скважины:

$$\begin{aligned} l'' &= 3,65 / \omega_e \sqrt{-0,5gz + \sqrt{0,25(gz)^2 + 2,68EIg\omega_e^2/q}} = 3,65 / 38,6 \times \\ &\times \sqrt{-0,5 \cdot 9,81(-756) + \sqrt{0,25(9,81 \cdot 756)^2 + 2,68 \cdot 4056 \cdot 9,81 \cdot 38,6^2 / 6,04}} = \\ &= 9,47 \text{ м}, \end{aligned}$$

где $\omega_e = \omega(k_\omega - \beta)/(1 - \beta) = 43(0,97 - 0,706)/(1 - 0,706) = 38,6 \text{ с}^{-1}$; $k_\omega = 0,97$; $\beta = d/D_c = 50/70,8 = 0,706$; $z = L - l - 100 = 756 \text{ м}$.

8. Напряжение изгиба в растянутой части КБТ на расстоянии 100 м от устья скважины:

$$\begin{aligned}\sigma'_i &= 5,6Edf/(l'')^2 = \\ &= 5,6 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 0,54 / (9,47^2 \cdot 10^4) = 35,4 \text{ даН/см}^2 \approx 3,5 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Напряжение изгиба в сжатой части КБТ ($z = +140 \text{ м}$):

$$\begin{aligned}\sigma''_i &= fqzdc\cos\alpha_0/(4I) = \\ &= 0,54 \cdot 6,04 \cdot 140 \cdot 5 \cdot 1 / (4 \cdot 19,3) = 29,6 \text{ даН/см}^2 \approx 3 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

9. Длина полуволны КБТ, образующейся под действием продольных и поперечных сил с учетом взаимодействия БТ со стенками скважины в зоне нейтрального сечения:

$$\begin{aligned}l_n &= 3,65/\omega_e \sqrt{2,68EIg\omega_e^2/q} = \\ &= 3,65/38,6 \sqrt{2,68 \cdot 4056 \cdot 9,81 \cdot 38,6^2/6,04} = 6,77 \text{ м}.\end{aligned}$$

10. Напряжение изгиба в зоне нейтрального сечения:

$$\begin{aligned}\sigma_{и.н.} &= 5,6Edf/l_n^2 = 5,6 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 0,54 / (6,77^2 \cdot 10^4) = \\ &= 69,3 \text{ даН/см}^2 \approx 7 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

11. Запас прочности в растянутой части КБТ в 100 м от устья скважины по нормальным напряжениям:

$$\begin{aligned}m_\sigma &= \sigma_T \sigma_{-1} / (\sigma_T \sigma_{и} + \sigma_{-1} \sigma_p) = \\ &= 380 \cdot 63 / (380 \cdot 3,5 + 63 \cdot 65) = 4,4,\end{aligned}$$

где $\sigma_p = k\varphi(L' - l)(\gamma - \gamma_{ж}) = 1,05 \cdot 1,2(900 - 144)(7,85 - 1)10^4 = 65 \text{ МПа}$; $L' = L - 100 = 900 \text{ м}$.

Запас прочности по касательным напряжениям $m_\tau = \tau_T/\tau'$. Величина τ' определяется из предположения о пропорциональном увеличении крутящего момента от забоя к устью

скважины. Крутящий момент у устья $M_k = 8752$ даН·см; крутящий момент у забоя:

$$M_{к.з.} = 97400 \cdot 1,2 N_T / n = 97400 \cdot 1,2 \cdot 2,6 / 414 = 734 \text{ даН} \cdot \text{см}.$$

Из эпюры моментов КБТ (рис. 10):

$$M'_k = [M_k(L - t) + M_{к.з.}t] / L = [8752(1000 - 100) + 734 \cdot 100] / 1000 = 7950 \text{ даН} \cdot \text{см},$$

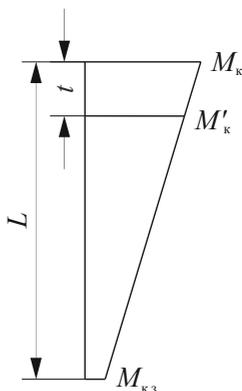


Рис. 10. Эпюра моментов КБТ

где $t = 100$ м.

Следовательно, $\tau = M'_k / W = 7950 / 15,4 = 516$ даН/см² $\approx 51,6$ МПа; $m_\tau = 190 / 51,6 = 3,7$.

Запас прочности при сложном напряженном состоянии:

$$m_{II} = m_\sigma m_\tau / \sqrt{m_\sigma^2 + m_\tau^2} = 4,4 \cdot 3,7 / \sqrt{4,4^2 + 3,7^2} = 2,8.$$

12. Запас прочности в нейтральном сечении КБТ:

$$m_{III} = \sigma_{-1} / \sigma_{и.н.} = 63 / 7 = 9.$$

13. Напряжение кручения в КБТ при срыве керна:

$$\tau = D_k^3 d \tau_k / (d^4 - d_1^4) = 4,4^3 \cdot 5 \cdot 170 / (5^4 - 3,9^4) = 184 \text{ даН/см}^2 \approx 18,4 \text{ МПа} < [\tau] = 100 \text{ МПа},$$

где $\tau_k = \sigma_{сж} / f = 1700 / (10 \div 15) = 170 \div 113$ даН/см²; f – коэффициент крепости гранита.

14. Касательное напряжение при инерционном скручивании КБТ в результате ее внезапной остановки:

$$\tau_{и} = 12,1 \omega d = 12,1 \cdot 43 \cdot 0,05 = 26 \text{ МПа}.$$

15. Допустимый угол искусственного искривления скважины с помощью клина:

$$\alpha_{\max} = 115[\sigma_{\text{и}}]L_{\text{к}}/(dE) = 115 \cdot 630 \cdot 2 \cdot 10^2 / (5 \cdot 2,1 \cdot 10^6) = 1,38^\circ.$$

Действительный угол искривления:

$$\alpha = \arctg(D_{\text{с}}/L_{\text{к}}) = \arctg(0,0708/2) = 2,03^\circ.$$

Следовательно, клин со скосом $L_{\text{к}}$ длиной 2 м по условиям прочности КБТ использовать не рекомендуется.

Таким образом, КБТ при заданных начальных условиях может использоваться при бурении скважины на глубине 1000 м станком ЗИФ-1200 МР с оптимальной частотой вращения 414 мин⁻¹ и запасом прочности 2,8 (достаточным).

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

Лабораторная работа 5 РАСЧЕТ УТЯЖЕЛЕННЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ (УБТ)

Цель работы. Освоение методики расчёта характеристик утяжеленных бурильных труб.

Задание

1. Выбор и определение длины УБТ.
2. Расчет критической длины невращающихся УБТ и соответствующей осевой нагрузки и сравнение результата с критической длиной нормальных бурильных труб (НБТ).
3. Определение напряжения в УБТ при внезапной остановке их вращения.

Начальные условия

Диаметр скважины D , осевая нагрузка на забой C , диаметр НБТ d , толщина стенки НБТ δ , вес 1 м НБТ q , частота вращения КБТ n .

Общие положения

УБТ предназначены для установки в нижнюю часть буровой колонны с целью увеличения её жесткости, большей устойчивости и передачи нагрузки на долото в заданных пределах. Данные трубы имеют массивные утолщенные стенки и составляют основную и весьма ответственную часть компоновки низа буровой колонны.

Порядок выполнения работы

1. Определение критической длины сжатой части НБТ:

$$l_{кр} = \sqrt[3]{2\pi^2 EI/q}, \quad (82)$$

где EI – жесткость НБТ.

2. Расчет осевой нагрузки для сжатой части НБТ при невращающейся колонне буровых труб:

$$C_1 = ql_{кр}. \quad (83)$$

Проверка соответствия $l_{кр}$ осевой нагрузке на забой.

3. Выбор УБТ осуществляется на основании данных, представленных в таблице 16.

Таблица 16

Характеристики УБТ

D_n , мм	73	89	108
D_b , мм	41	51	56
Длина трубы с замками, мм	4500	4500	4500
Масса трубы, кг	86	128	192

Определение критической длины сжатой части УБТ и соответствующей ей осевой нагрузки при невращающейся колонне буровых труб:

$$l_{кр} = \sqrt[3]{2\pi^2 EI_{УБТ}/q_{УБТ}}, \quad (84)$$

где $EI_{УБТ}$ – жесткость УБТ; $q_{УБТ}$ – вес 1 м трубы.

Проверка соответствия $l_{кр}$ осевой нагрузке на забой.

4. Определение действительной (технологической) длины УБТ:

$$l_{\text{УБТ}} = (1,3 \div 1,5)C/q_{\text{УБТ}}. \quad (85)$$

5. Определение напряжения кручения (инерционного напряжения кручения), вызванного внезапной остановкой (скручиванием по инерции) вращения колонны с УБТ:

$$\tau_{\text{и}} = \pi n D_{\text{н}}/2,5 < [\tau] = 100 \text{ МПа}. \quad (86)$$

В результате расчетов оценивается возможность использования УБТ, не подверженных продольному изгибу.

Пример. Выбрать и рассчитать УБТ для следующих начальных условий: диаметр скважины $D = 112$ мм; осевая нагрузка на забой $C = 12$ кН; диаметр НБТ $d = 63,5$ мм (муфтово-замковые соединения); толщина стенки НБТ $\delta = 6$ мм; вес 1 м труб $q = 8,51$ даН; частота вращения КБТ $n = 136$ мин⁻¹.

Решение. 1. Критическая длина сжатой части НБТ при невращающейся колонне:

$$l_{\text{кр}} = \sqrt[3]{2\pi^2 EI/q} = \sqrt[3]{2 \cdot 3,14^2 \cdot 9504/8,51} = 28 \text{ м},$$

где $EI = E\pi(d^4 - d_1^4)/64 = 2,1 \cdot 10^{10} \cdot 3,14(6,35^4 - 5,15^4)10^{-8}/64 = 9504$ даН·м²; d_1 – внутренний диаметр НБТ, $d_1 = 51,5$ мм.

2. Осевая нагрузка на забой, соответствующая $l_{\text{кр}}$:

$$C_1 = ql_{\text{кр}} = 8,51 \cdot 28 = 238 \text{ даН}.$$

Так как $C_1 < C$, продольный изгиб НБТ происходит при незначительной осевой нагрузке на забой.

3. В соответствии с диаметром скважины выбираем УБТ диаметром 108 мм. Критическая длина сжатой части УБТ при невращающейся колонне:

$$l_{\text{кр}} = \sqrt[3]{2\pi^2 EI_{\text{УБТ}}/q_{\text{УБТ}}} = \sqrt[3]{2 \cdot 3,14^2 \cdot 130040 \cdot 4,5/192} = 39,2 \text{ м}.$$

где $E I_{\text{УБТ}} = E \pi (D_{\text{н}}^4 - D_{\text{в}}^4) / 64 = 2,1 \cdot 10^{10} \cdot 3,14 (10,8^4 - 5,6^4) \times 10^{-8} / 64 = 130040 \text{ даН} \cdot \text{м}^2$.

Осевая нагрузка на забой, соответствующая $l_{\text{кр}}$:

$$C_2 = q_{\text{УБТ}} l_{\text{кр}} = 192 \cdot 39,2 / 4,5 = 1671 \text{ даН.}$$

Так как $C_2 > C$, УБТ не теряет устойчивости при бурении с принятой осевой нагрузкой на забой 12 кН.

4. Действительная (технологическая) длина УБТ:

$$l_{\text{УБТ}} = 1,5 \cdot 12 \cdot 10^2 \cdot 4,5 / 192 = 42,2 \text{ м,}$$

что соответствует длине девяти утяжеленных бурильных труб.

5. Напряжение кручения, вызванное внезапной остановкой (скручиванием по инерции) колонны с УБТ:

$$\tau_{\text{и}} = \pi n D_{\text{н}} / 2,5 = 3,14 \cdot 136 \cdot 0,108 / 2,5 = 18,4 \text{ МПа} \ll [\tau] = 100 \text{ МПа.}$$

Таким образом, бурение с выбранными УБТ диаметром 108 мм ведется без их продольного изгиба под действием осевой нагрузки на забой.

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

Лабораторная работа 6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ОБСАДНЫХ ТРУБ ДИАМЕТРОМ 168 мм

Цель работы. Разработка проекта эксплуатационной колонны диаметром 168 мм.

Задание

1. Произвести расчёт эксплуатационной колонны на избыточное наружное давление и на растяжение.

2. Вычертить в выбранном масштабе схему конструкции скважины, эпюру внешнего давления и схему рассчитанной колонны.

Начальные условия

Глубина скважины L ; глубина уровня жидкости в обсадной колонне H_y ; глубина уровня цементного раствора (цементного камня) за колонной h ; глубина спуска предыдущей обсадной колонны H_0 ; длина зоны эксплуатационного объекта l ; плотность жидкости, заполняющей обсадную колонну, $\rho_{ж}$; плотность бурового раствора ρ_p ; плотность жидкости, заполняющей поры цементного камня $\rho_{г.с.}$.

Общие положения

Обсадные колонны рассчитываются по максимальным значениям избыточных наружных и внутренних давлений, а также осевых нагрузок, возникающих при бурении, опробовании, эксплуатации и ремонте скважин. Расчет производится с учетом условий строительства скважины: значений горного и пластового давлений и интервалов их действия, давления гидроразрыва пласта и давления на устье скважины при закрытом противовыбросовом оборудовании, снижения уровня жидкости в скважине и плотности бурового раствора при нефте-, газо- и водопроявлениях. По результатам расчета определяют типоразмер и длину секций обсадной колонны.

Расчет эксплуатационных колонн для нефтегазовых скважин производится для следующих видов нагрузок:

- расчет на избыточные наружные (сминающие) давления;
- расчет на растяжения (страгивание);
- расчет на избыточное внутреннее давление (разрыв).

Порядок выполнения работы

Рассмотрим частный случай расчета обсадной колонны в период эксплуатации от действия избыточных наружных

давлений (более подробная и полная информация по расчету эксплуатационных колонн приведена в работе [2]).

1. В определенном (удобном) вертикальном масштабе строится конструкция скважины, изображающая эксплуатационную колонну, глубину уровня цементного раствора за колонной h , глубину спуска предыдущей обсадной колонны H_0 , глубину скважины по вертикали L , глубину уровня жидкости в обсадной колонне H_y , длина зоны эксплуатационного объекта l . (рис. 11, *a*).

2. Эюра внешнего избыточного давления на эксплуатационную колонну в период эксплуатации (рис. 11, *б*) строится по рассчитанному давлению в точках A , B , C и D соответственно:

$$p_A = 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(L - h) - \rho_{ж.}(L - H_y)], \quad (87)$$

$$p_B = 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(H_y - h)], \quad (88)$$

$$p_C = 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(H_0 - h)], \quad (89)$$

$$p_D = 10^{-6}g\rho_p h, \quad (90)$$

Давление в точке O равно нулю. Из характера представленных уравнений и конструкции скважины следует, что давление в каких-либо ещё точках определять не нужно.

3. Вычисляется величина сминающего давления для труб нижней секции:

$$p_{см1} = p_A[n_{см}], \quad (91)$$

где $[n_{см}]$ – коэффициент запаса прочности при расчете на смятие, для зоны эксплуатационного объекта в зависимости от устойчивости коллектора принимается равным $1,0 \div 1,3$, для остальных интервалов – $1,0$. Зона эксплуатационного объекта включает в себя мощность пласта, увеличенную на 50 м выше кровли пласта.

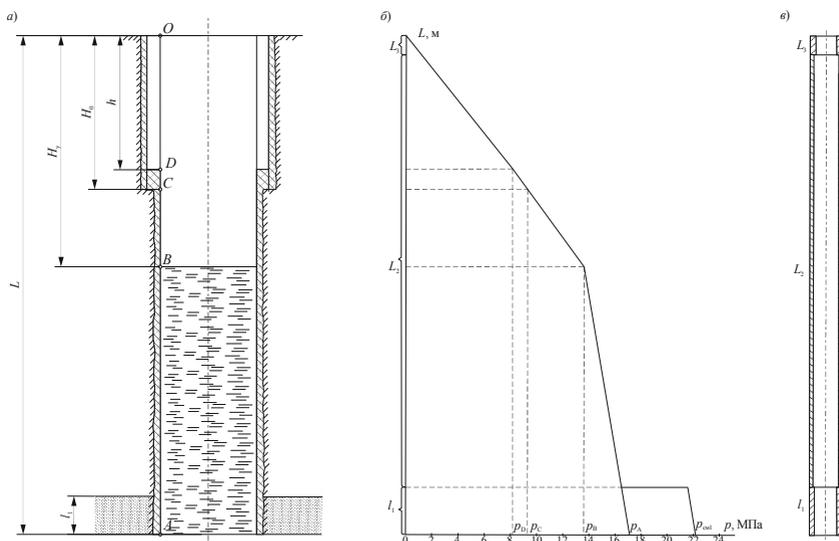


Рис. 11. Схема расчета эксплуатационной колонны: *а* – конструкция скважины; *б* – эпюра внешнего давления; *в* – схема рассчитанной колонны

Интервалы, где требуется повысить коэффициент запаса прочности на смятие (более 1,0), выделяется на эпюре избыточных наружных давлений путём построения дополнительных выступов (рис. 11, *б*), характеризующих избыточное наружное давление, которое должна выдержать обсадная колонна с учетом принятого коэффициента запаса прочности.

Для компоновки первой (нижней) секции рекомендуется использовать в первую очередь трубы из стали более низкой прочности, например, группы прочности Д, как менее дорогие. Толщина стенки нижней секции может быть повышенной.

По таблице 17 подбираются трубы с соответствующей толщиной стенки δ_1

Таблица 17

Прочностные характеристики обсадных труб диаметром 168 мм из сталей различных марок (ГОСТ 632-80)

δ , мм	q , даН/м	Страгивающая нагрузка для труб с треугольной резьбой из стали марок, кН			Сминающее давление для труб из стали марок, МПа		
		Д	К	Е	Д	К	Е
7,3	29,4	880	1098	1280	16,6	18,9	19,9
8,9	35,4	1130	1392	1640	24,4	29,1	31,3
10,6	41,4	1380	1706	2010	32,7	40,3	44,0
12,1	46,5	1600	1981	2320	39,9	49,9	55,0

4. Определяются параметры первой секции. Часто длину первой секции первоначально принимают равной длине эксплуатационного объекта, $l_1 = l$. Вес нижней секции:

$$Q_1 = q_1 l_1, \quad (92)$$

где q_1 – вес одного метра труб первой секции (определяется в соответствии с табл. 17).

5. Определяется величина сминающего давления второй снизу секции. Для этого на эпюре находят давление на верхнем конце первой секции p_2 (рис. 11, б):

$$p_{см2} = p_2 [n_{см}], \quad (93)$$

Затем выбирают трубы для второй секции с соответствующими значениями δ_2 и q_2 (табл. 17). Для второй секции выбирают трубы, которые могут иметь сминающее давление ниже, чем трубы первой секции, т.к. с уменьшением глубины наружное избыточное давление снижается (см. рис. 11, б). Первоначальную глубину перехода от первой секции ко второй можно определить, узнав по эпюре, на какой глубине сминающее давление для труб второй секции будет равно наружному избыточному давлению с учетом принятого коэффициента запаса прочности (формула (93)). Графически эту точку можно получить при пересечении вертикальной линии, соот-

ветствующей $p_{см}$ для труб второй секции (табл. 17), с обобщающей эпюрой избыточного наружного давления. Затем следует уточнить критическое сминающее давление для низа второй секции с учетом того, что на низ второй секции действует растягивающая нагрузка, равная весу первой секции:

$$p'_{см2} = p_{см}(1 - 0,3Q_1/Q_T), \quad (94)$$

где $p_{см}$ – сминающее давление для обсадных труб, МПа; Q_T – растягивающая нагрузка для второй секции, при которой напряжение в теле труб становится равным пределу текучести, кН.

Растягивающая нагрузка выбирается по таблице в зависимости от марки стали и толщины стенки трубы или вычисляется по следующей формуле:

$$Q_T = \sigma_T F_T, \quad (95)$$

где σ_T – предел текучести материала труб, МПа (табл. 18); F_T – площадь поперечного сечения труб, м².

Таблица 18

Основные механические свойства материала обсадных труб

Показатели	Группа прочности стали						
	Д	К	Е	Л	М	Р	Т
Временное сопротивление разрыву, МПа	650	700	703	773	879	1019	1125
Предел текучести, МПа	380	500	565	668	773	949	1055
Относительное удлинение, %	16	12	13	12,3	10,8	9,5	8,5

6. Определяется длина второй секции l_2 . Для этого выбираются трубы для третьей секции с необходимой толщиной стенки δ_3 (обычно следующей в сторону уменьшения за δ_2) и группой прочности. И определяется, с какой глубины они могут быть установлены (по графику избыточных давлений).

По величине критического сминающего давления для труб третьей секции $p_{см}$ по эпюре избыточных наружных дав-

лений (рис. 11, б) определяют ориентировочную глубину установки низа этой секции, первоначальную длину l'_2 и вес второй секции Q'_2 :

$$l'_2 = L - l_1 - l'_3, \quad (96)$$

$$Q'_2 = q_2 l'_2. \quad (97)$$

Затем рассчитывается величина $p'_{см3}$ для нижних труб третьей секции и уточняется глубина, на которую они могут быть спущены:

$$p'_{см3} = p_{см}(1 - 0,3(Q_1 + Q'_2)/Q_T). \quad (98)$$

После этого уточняется длина и вес второй секции:

$$l_2 = L - l_1 - l''_3, \quad (99)$$

$$Q_2 = q_2 l_2. \quad (100)$$

Аналогично выбирают трубы для компоновки последующих секций обсадной колонны.

7. Выбранную из расчета на избыточное наружное давление компоновку эксплуатационной колонны необходимо проверить на осевые растягивающие нагрузки. Для этого последовательно (снизу вверх) для верха каждой секции рассчитывают коэффициент запаса прочности на растяжение (страгивание):

$$n_{стр} = Q_{стр} / \sum q_i l_i \geq [n_{стр}], \quad (101)$$

где $Q_{стр}$ – страгивающая нагрузка для труб, кН; $\sum q_i l_i$ – суммарный вес рассчитываемой и нижележащих секции обсадной колонны в воздухе, кН; $[n_{стр}]$ – нормативный коэффициент запаса прочности на страгивание (принимается по табл. 19).

Таблица 19

Значение коэффициента запаса прочности на страгивание для труб с треугольной резьбой

Диаметр труб, мм	Длина колонны, м	$[n_{\text{стр}}]$
114...168	до 3000	1,15
	более 3000	1,30

Если при проверке для очередной секции обсадной колонны условие (101) не выполняется, то длину этой секции необходимо определить исходя из расчета на страгивание (растяжение):

$$L_i = [(Q_{\text{стр}}/[n_{\text{стр}}] - \sum Q'_i)]/q_i, \quad (102)$$

где $\sum Q'_i$ – вес нижележащих секций (без учёта рассчитываемой).

Эта секция обсадной колонны будет разграничивающей, т.к. следующие (вышележащие) секции должны быть более прочными, а их длина подбираться из расчёта на страгивание по выражению (102).

8. Далее расчет ведется аналогично п.7 до тех пор, пока не выполняется условие:

$$l_1 + l_2 + \dots + l_n + L_{n+1} + L_{n+2} + \dots + L_k \geq L. \quad (103)$$

9. Определяется полный вес эксплуатационной колонны Q_0 и вычерчивается ее эскиз (рис. 11, в).

Пример. Пример. Спроектировать эксплуатационную колонну диаметром 168 мм для следующих начальных условий (рис. 11): глубина скважины $L = 2600$ м; глубина уровня жидкости в обсадной колонне $H_y = 1200$ м; глубина уровня цементного раствора (цементного камня) за колонной $h = 700$ м; глубина спуска предыдущей обсадной колонны $H_0 = 800$ м; длина зоны эксплуатационного объекта $l = 200$ м; плотность жидкости, заполняющей обсадную колонну, $\rho_{\text{ж}} = 800$ кг/м³;

плотность бурового раствора $\rho_p = 1200 \text{ кг/м}^3$, плотность жидкости, заполняющей поры цементного камня $\rho_{г.с.} = 1100 \text{ кг/м}^3$.

Решение. 1. Построение конструкции скважины (рис. 11, а).

2. Давление в точках *A*, *B*, *C* и *D* соответственно:

$$\begin{aligned} p_A &= 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(L - h) - \rho_{ж}(L - H_y)] = \\ &= 10^{-6} \cdot 9,8[1200 \cdot 700 + 1100(2600 - 700) - 850(2600 - 1200)] = \\ &= 17,1 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_B &= 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(H_y - h)] = \\ &= 10^{-6} \cdot 9,8[1200 \cdot 700 + 1100(1200 - 700)] = 13,6 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_C &= 10^{-6}g[\rho_p h + \rho_{г.с.}(H_0 - h)] = \\ &= 10^{-6} \cdot 9,8[1200 \cdot 700 + 1100(800 - 700)] = 9,3 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

$$p_D = 10^{-6}g\rho_p h = 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot 1200 \cdot 700 = 8,2 \text{ МПа}.$$

Построение эпюры (рис. 11, б).

3. Сминающее давление для труб нижней секции:

$$p_{см1} = p_A[n_{см}] = 17,1 \cdot 1,3 = 22,2 \text{ МПа}.$$

4. Для компоновки низа обсадной колонны по табл. 17 выбираем трубы диаметром 168 мм марки Д с толщиной стенки $\delta_1 = 8,9 \text{ мм}$, которые выдерживают расчетное сминающее давление. Параметры первой (нижней) секции колонны труб:

$$\begin{aligned} l_1 &= 250 \text{ м}; \delta_1 = 8,9 \text{ мм}; q_1 = 35,4 \text{ даН/м}; Q_1 = q_1 l_1 = \\ &= 35,4 \cdot 250 = 8850 \text{ даН}. \end{aligned}$$

Выше могут быть установлены менее прочные трубы, например, трубы диаметром 168 мм марки Д с толщиной стенки $\delta_2 = 7,3 \text{ мм}$, для которых сминающее давление $p_{см} = 16,6 \text{ МПа}$.

5. По эпюре величина внешнего давления на верхнем конце первой секции $p_{см2} = 16,1$ МПа. Соответствующее сминающее давление для низа второй секции с учетом того, что на низ второй секции действует растягивающая нагрузка:

$$p'_{см2} = p_{см}(1 - Q_1/Q_T) = 16,6(1 - 0,3 \cdot 88,5/1406) = 16,3 \text{ МПа,}$$

$$Q_T = \sigma_T F_T = 380 \cdot 10^3 \cdot 0,0037 = 1406 \text{ кН.}$$

Так как величина сминающего давления для труб второй секции уменьшилась незначительно, а точка пересечения линии этого давления с эпюрой ($p_{см} = 16,6$ МПа) находится ниже нижней границы давлений для второй секции ($p_{см2} = 16,1$ МПа), то длина первой секции не изменится и останется равной 250 м.

Параметры второй секции колонны труб:

$$l_2 = 2350 \text{ м; } \delta_2 = 7,3 \text{ мм; } q_2 = 29,4 \text{ даН/м; } Q_2 = q_2 l_2 = 29,4 \cdot 2350 = 69090 \text{ даН.}$$

Таким образом, первоначальная компоновка эксплуатационной колонны будет состоять из двух секций (табл. 20).

Таблица 20

Компоновка эксплуатационной колонны из расчета на избыточное давление

Номер секции	Толщина стенки, мм	Группа прочности стали	Интервал установки, м	Длина секции, м	Вес секции, кН
1	8,9	Д	2350-2600	250	88,5
2	7,3	Д	0-2350	2350	690,9

6. Проверка секций эксплуатационной колонны на осевые растягивающие нагрузки:

$$n_{стр1} = Q_{стр1}/q_1 l_1 = 1130/88,5 = 12,8 > [n_{стр}] = 1,15,$$

$$n_{стр2} = Q_{стр2}/(q_1 l_1 + q_2 l_2) = 880/(88,5 + 690,9) = 1,13 < [n_{стр}] = 1,15.$$

Исходя из расчетов, следует, что длина второй секции должна быть пересчитана из условия на страгивание.

7. Длина второй (разделительной) секции из расчета на страгивание:

$$L_2 = [Q_{\text{стр}2}/[n_{\text{стр}}] - q_1 l_1]/q_2 = [880/1,15 - 88,5]/0,3 = 2255 \text{ м.}$$

Параметры второй секции:

$$L_2 = 2255 \text{ м; } \delta_2 = 7,3 \text{ мм; } q_2 = 29,4 \text{ даН/м; } Q_2 = q_2 L_2 = 29,4 \cdot 2255 = 66297 \text{ даН.}$$

8. Для компоновки третьей секции необходимо взять более прочные трубы, с большей толщиной стенки.

$$L_3 = [Q_{\text{стр}3}/[n_{\text{стр}}] - (q_1 l_1 + q_2 L_2)]/q_3 = [1130/1,15 - (88,5 + 663)]/0,36 = 642 \text{ м.}$$

Исходя из необходимой длины колонны 2600 м, фактическая длина третьей секции:

$$L_3 = L - l_1 - L_2 = 2600 - 250 - 2255 = 95 \text{ м.}$$

Параметры третьей секции:

$$L_3 = 95 \text{ м; } \delta_3 = 8,9 \text{ мм; } q_3 = 35,4 \text{ даН/м; } Q_3 = q_3 L_3 = 35,4 \cdot 95 = 3363 \text{ даН.}$$

Таким образом, конечная компоновка эксплуатационной колонны будет состоять из трёх секций (табл. 21).

Таблица 21

Компоновка эксплуатационной колонны из расчета на избыточное давление и страгивание

Номер секции	Толщина стенки, мм	Группа прочностии стали	Интервал установки, м	Длина секции, м	Вес секции, кН
1	8,9	Д	2350-2600	250	88,5
2	7,3	Д	95-2350	2350	690,9
3	8,9	Д	0-95	95	33,6

9. Полный вес эксплуатационной колонны:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 88,5 + 690,9 + 33,6 = 813 \text{ кН.}$$

10. Построение эскиза (рис.11, в).

Обработка результатов и их представление

Отчёт по лабораторной работе должен быть набран при помощи ПК, распечатан на листе формата А4 и должен содержать следующие разделы: цель работы, основные теоретические сведения, результаты работы, вывод.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ганджумян, Р.А. Расчеты в бурении: Справочное пособие / Р.А. Ганджумян, А.Г. Калинин, Н.И. Сердюк. – М.: РГГРУ, 2007. – 668 с.
2. Долгих, Л.Н. Крепление, испытание и освоение нефтяных и газовых скважин: Учебное пособие / Л.Н. Долгих. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2007. – 189 с.
3. Воздвиженский, Б.И. Буровая механика / Б.И. Воздвиженский, М.Г. Васильев. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 492 с.
4. Ильский, А.Л. Расчет и конструирование бурового оборудования: Учебное пособие для вузов / А.Л. Ильский, Ю.В. Миронов, А.Г. Чернобыльский. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
5. Кирсанов, А.Н. Буровые машины и механизмы / А.Н. Кирсанов, В.П. Зиненко, В.Г. Кардыш. – М.: Недра, 1981. – 448 с.
6. Литвиненко, В.С. Инженерные расчеты бурового оборудования и инструмента: Учебное пособие / В.С. Литвиненко, И.Г. Шелковников. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – 86 с.
7. Поляков, Г.Д. Вышки и мачты в разведочном бурении (конструирование и расчет) / Г.Д. Поляков, Е.С. Булгаков. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1975. – 182 с.
8. Саркисов, Г.М. Расчеты бурильных и обсадных колонн / Г.М. Саркисов. – М.: Недра, 1971. – 208 с.
9. Шелковников, И.Г. Прикладная буровая механика: Учебное пособие / И.Г. Шелковников. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 1997. – ч. 1. – 157 с.
10. Шелковников, И.Г. Прикладная буровая механика: Учебное пособие / И.Г. Шелковников. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 1998. – ч. 2. – 112 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Расчеты буровых вышек и мачт	4
Расчет трехгранной буровой вышки (треноги)	4
Расчет четырехгранной металлической вышки	12
Проверочный расчет буровых мачт	32
2. Расчет бурильных и обсадных труб	38
Расчеты колонны бурильных труб, оценка их прочности	38
Расчет утяжеленных бурильных труб (УБТ).....	50
Проектирование эксплуатационной колонны обсадных труб диаметром 168 мм.....	53
Рекомендательный библиографический список	65

БУРОВЫЕ МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности 21.05.03*

Сост.: *Н.И. Васильев, М.Ю. Мерзляков, А.В. Подоляк*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
бурения скважин

Ответственный за выпуск *М.Ю. Мерзляков*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 10.01.2019. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,8. Усл.кр.-отт. 3,8. Уч.-изд.л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 8. С 5.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2