

РАСЧЕТ МАЧТЫ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрен расчет на прочность мачты буровой установки с учетом всех рабочих нагрузок. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния мачты буровой установки. В расчетах использован метод конечных элементов. Приведена математическая модель расчета действующих на мачту нагрузок. Проведены исследования для мачт различных исполнений и выявлены места наибольших напряжений. Расчет напряжений выполнен в специализированном программном пакете APM WinMachine. Выполнен пример расчета по предлагаемой методике для буровой установки геологоразведочного бурения. Алгоритм предлагаемой методики включает этапы создания моделей формы, закреплений, нагружений. Заданием вариантов сечений и материалов обеспечивается поиск рациональных параметров мачт.

Ключевые слова: расчет на прочность металлоконструкции, мачта, буровая установка, метод конечных элементов, APM WinMachine.

Проектирование и расчет металлоконструкций с определением напряженно-деформированного состояния (НДС) долгий и трудоемкий процесс. Для реализации поставленных целей и выполнения всех необходимых расчетов существует ряд специализированных программных продуктов, основанных на методе конечных элементов (МКЭ), которые облегчают и сокращают время прочностных расчетов и проектирования технической системы, к которой относится буровая установка. Расчет методом конечных элементов выполняется в таких программах как Ansys, UnixGraphiks, SolidWorks, APM WinMachine и др.

В нашем случае расчеты были проведены в среде автоматизированного проектирования APM WinMachine в модуле расчета НДС трехмерных конструкций Structure-3D методом конечных элементов. Программа разработана Научно-техническим центром АПМ (г. Королев) и имеет Сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00524 (система сертификации ГОСТ Р ГОССТАНДАРТ РОССИИ) для программного модуля APM Structure3D от 15.08.2012 г и аттестационный паспорт программного средства от 18.04.2013, выданный РОСТЕХНАДЗОР, ФБУ «НТЦ ЯРБ». Точность расчета методом конечных элементов се-

рьезно зависит от адекватности моделей описывающих испытуемый объект. Расчетная модель состоит из модели формы, модели материала, модели закрепления и модели нагружения [1, 2].

В качестве конечных элементов (КЭ) для создания виртуальной модели формы были использованы стержневые конечные элементы, так как применение объемных конечных элементов затрудняет наложение всех нагрузок, действующих на мачту в процессе работы, поскольку размеры поперечного сечения несущих элементов, значительно меньше их длины. Так, например, длина мачты 7000 мм, а ширина мачты 400 мм. Применение стержневого КЭ целесообразно, если размеры его поперечного сечения, не менее чем, в пять раз меньше длины самого элемента.

На рис. 1 приведена конструктивная схема буровой установки. Мачта буровой установки представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из швеллеров и уголков. Недостаток таких мачт состоит в сложности и трудоемкости изготовления, коррозии сварных швов и др. Мы предлагаем изгото-

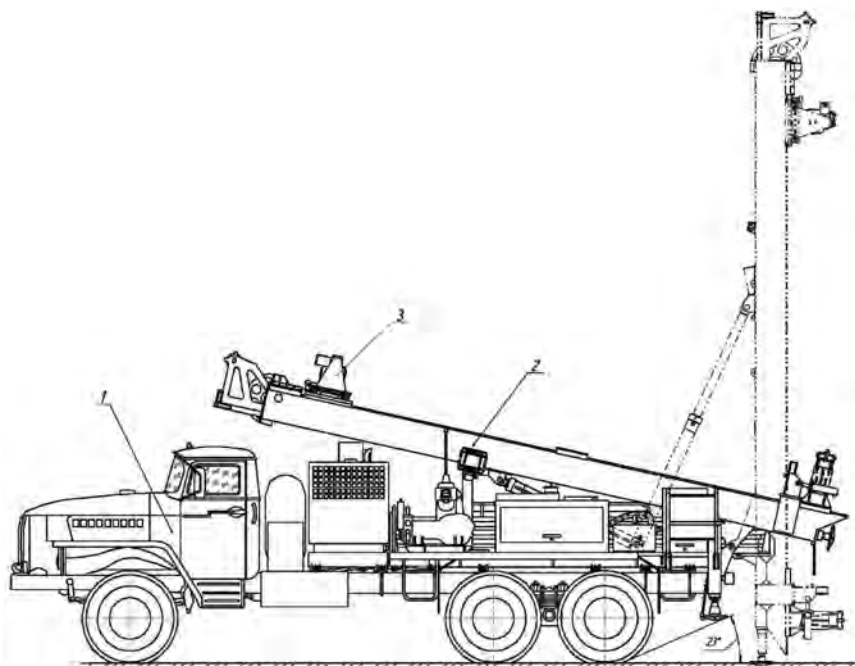


Рис. 1. Буровая установка: 1 – шасси буровой (КАМАЗ-5350); 2 – мачта буровой; 3 – подвижной привод

вить мачту буровой установки из гнутого профиля, что обеспечит снижение массы мачты и трудоемкости ее изготовления.

Применение сложного гнутого профиля потребует создания методики расчета. Расчет мачт с различными профилями сечений представляется трудоемким процессом, если выполнять его вручную, поэтому наш расчет возможен только при помощи специальных программ расчета. Выявим различия от воздействий рабочих нагрузок, проанализировав НДС.

Рассмотрев различные параметры рабочего процесса буровой установки, составим НДС металлоконструкции мачты. Анализ результатов расчетов позволит наметить пути совершенствования конструкции мачты и буровой установки в целом, снизить массу буровой установки, сократить время на транспортировку и монтажно-демонтажные работы. На основе исследований в дальнейшем будет создана методика оптимизации конструкции мачты буровой установки.

Математическая модель, необходимая для проведения исследований, представляет собой совокупность моделей нагружения, формы, материала и закрепления. Построение 3D-модели проведено в программных комплексах SolidWorks и Компас. С помощью step-форматов 3D модель передавалась в APM WinMachine, в модуль предпроцессорной подготовки APM Studio. В этом модуле задавались модели нагружения, материала и закрепления, проводилась подборка шага дискретизации и коэффициента сгущения. Непосредственно расчеты были сделаны в модуле APM Structure3D.

В настоящее время наиболее эффективным приближенным методом решения прикладных задач механики является метод конечных элементов.

Ключевая идея МКЭ заключается в том, что при анализе сплошная среда моделируется разбиением ее на конечные области (элементы), в каждой из которых поведение сплошной среды описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих собой перемещения в указанной области. Эти функции задаются в такой форме, чтобы они удовлетворяли условиям непрерывности описываемых ими характеристик во всей среде. Если же конструкция в целом неоднородна и состоит из большого количества отдельных конструктивных элементов, каждый из которых описывается своим дифференциальным уравнением, то метод конечных элементов является, по сути, единственным методом, позволяющим рассчитать напряженное состояние конструкции [3].

Планирование конечно-элементного исследования

1. Постановка цели и условий конечно-элементного расчета.

Целью расчета является металлоконструкция мачты, а именно определения следующих ее свойств: грузоподъемности, прочности, устойчивости к внешним нагрузкам.

2. Предварительное определение конфигурации и размеров рассчитываемой конструкции.

Металлоконструкция мачты рассматривается в статическом состоянии в различных условиях моделирования рабочего процесса и нагрузок возникающих в процессе эксплуатации.

3. Определение объекта моделирования и границ модели.

Объектом моделирования будет выбрана конструкция мачты буровой установки, состоящая из сечений различного профиля, представленных пластинчатыми и объемными элементами.

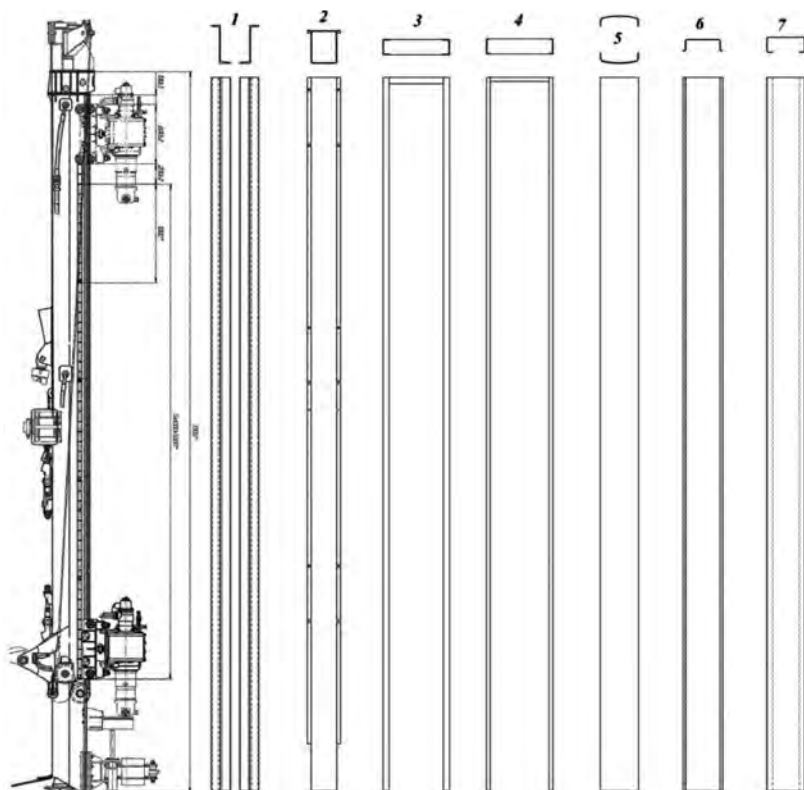


Рис. 2. Задание на расчет (варианты профилей мачты)

ми. В моделируемой металлоконструкции рядами фрагментов можно пренебречь (сварные швы, вспомогательные элементы, основания, ограждения).

4. Определение условий закрепления конструкции (граничных условий) и условий соединения элементов между собой.

В модели определены контактные поверхности и их граничные условия (запреты перемещения относительно друг друга, вращений).

5. Составление перечня действующих нагрузок, правил их вычисления и перечня вариантов расчета с указанием расчетных нагрузок.

В расчетной конструкции смоделированы следующие нагрузки: сила тяжести конструкции, нагрузка от силы тяжести подвешенного оборудования, нагрузка от максимальной грузоподъемности при эксплуатации буровой мачты, ветровые нагрузки [5, 6, 7].

На рис. 2. представлено задание на расчет буровых мачт.

Техническая характеристика рассчитываемых мачт: номинальная грузоподъемность — 5 т (50 000 Н); максимальный продолжительный момент при бурении — 6000 Н · м; масса подвесной части — 839 кг; усилие подачи — 40 000 Н.

Определен режим работы буровой установки: ликвидация аварии (прихват).

Нагрузки: нагрузка на крюке, $Q_{кр} = 50$ кН; максимальный продолжительный момент $M_{кр} = 6000$ Н · м; усилие от массы вращателя $F = 2500$ Н; усилие подачи $F_{п} = 40$ кН. Скорость ветра $V = 20$ м/с [1, п. 2.7–2.10]. На рис. 3 приведена схема нагрузок.

По результатам расчетов определены напряжения в элементах мачты, перемещения узлов, устойчивость конструкции, коэффициенты запаса.

Для создания 3х мерной модели мачты использовался программный продукт КОМПАС — 3D, SolidWorks. Далее созданную модель с помощью STEP формата импортируем в модуль предпроцессорной подготовки APM Studio.

Модуль APM Studio представляет собой инструмент для подготовки трехмерной модели с последующим конечно-элементным анализом. С помощью модуля APM Studio можно создать поверхностную или твердотельную модели, задать материал, указать граничные условия, построить конечно-элементную сетку (КЭС). При этом процедура генерация конечных элементов проводится автоматически. Кроме того, возможно импор-

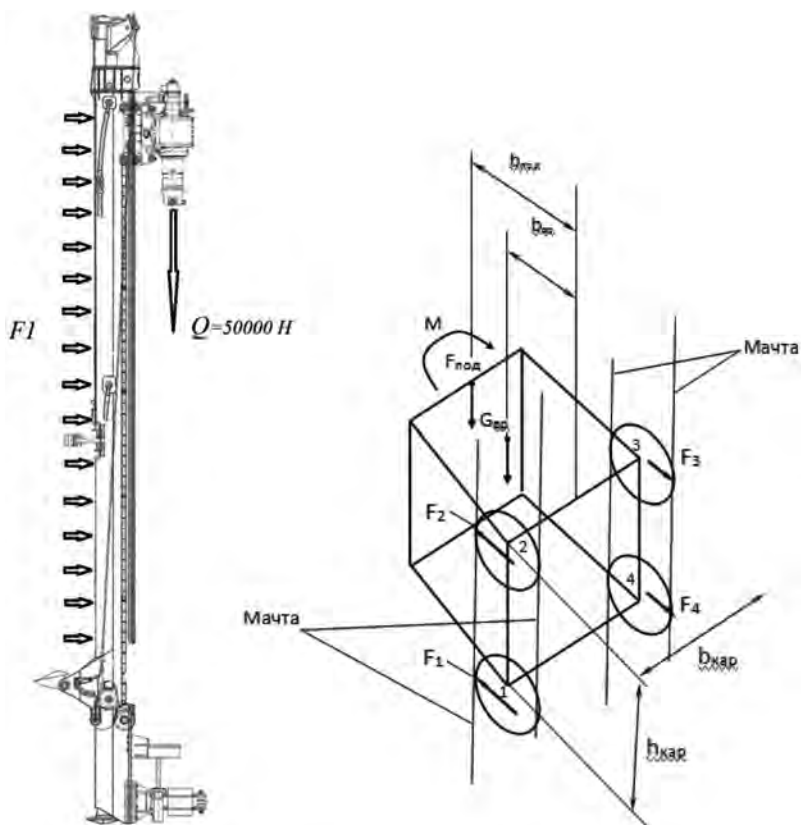


Рис. 3. Схема нагружения конструкции

тировать в модуль APM Studio 3D модель (сборочную единицу) из систем КОМПАС 3D или других сторонних трехмерных редакторов, использующих формат STEP 203 или SAT, что мы и сделали.

Для расчета модели, в нашем случае, представляющей собой объемный элемент, КЭС с закреплениями, совместными перемещениями и нагрузками будет передана для последующего редактирования и расчета в модуль APM Structure3D. Мы не производим сам расчет в APM Studio так как, в ней имеется сложность позиционирования импортированной модели относительно глобальной системы координат. Однако APM Structure3D позволяет производить такие действия без труда. Для выполнения расчетов необходимо перейти от конкретной детали к ее модели. При этом точность определения характери-

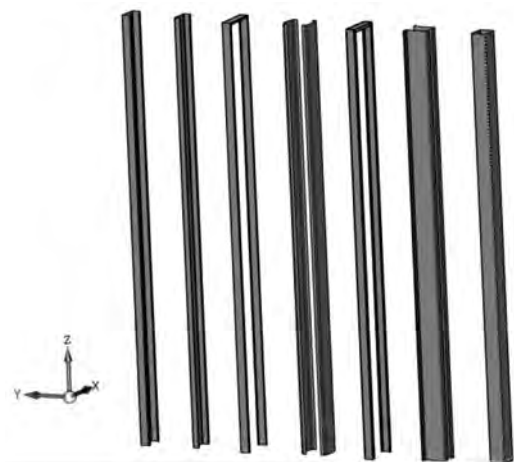


Рис. 4. Трехмерная модель базовой МК мачты, и мачт различных профилей

стик детали существенно зависит от нормальности самой модели. Используемая математическая модель, состоит из моделей: формы, материала, нагружения и закрепления [8, 9]. Рассмотрим каждую по отдельности.

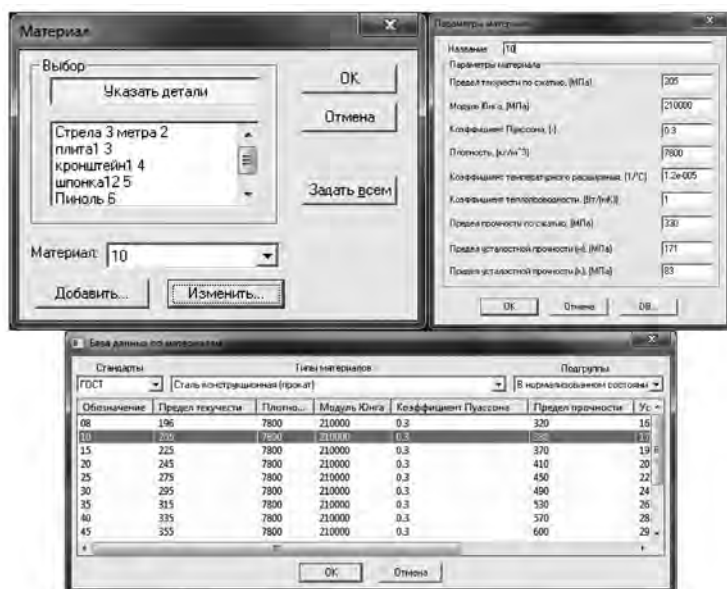


Рис. 5. Выбор материала для конечно-элементного анализа

Модель формы. 3D модель мачты МК буровой установки, созданную в КОМПАС 3D (рис. 4), посредством step-форматов передаем в модуль предпроцессорной подготовки АРМ Studio. Модель формы рассмотрена без дополнительного и навесного оборудования для сокращения и удобства расчетов.

Модель материала. В этой модели происходит подбор материала для металлоконструкций мачт, в нашем случае в качестве материала выбрана Сталь 10 ГОСТ 1050-88 (рис. 5).

Модель закрепления. Используем жесткое закрепление без возможности перемещения и поворота относительно точки закрепления (рис. 6).

Модель нагружения. При создании модели нагружения были рассмотрены действующие на конструкции мачт рабочие нагрузки с учетом их положения в пространстве.

Для определения влияния каждой из них составлены следующие расчетные случаи:

1. Мачты под углом 90°
 - верхнее расположение силового привода (СП);
 - нижнее расположение СП;
2. Мачты под углом 75°
 - верхнее расположение СП;
 - нижнее расположение СП;
3. Мачты под углом 30°
 - верхнее расположение СП;
 - нижнее расположение СП.

По результатам расчетов определены напряжения в элементах мачты, перемещения узлов, устойчивость конструкции, коэффициенты запаса, и коэффициент усталости.

Для нагрузки МК мачты произведен расчет усилий от силы тяжести колонны труб, крутящего момента от привода, влияния ветровой нагрузки с учетом положения СП.

Воздействие сил тяжести привода и нагрузки на крюке, нагрузки от усилия подачи, крутящего момента от привода на мачту (см. рис. 3), представлено как действие такого силового фактора как сила, распределенная по узлам конструкции.



Рис. 6. Модель закрепления

Со стороны вращателя действует крутящий момент M , сила тяжести вращателя $G_{\text{вр}}$, усилие подачи $F_{\text{под}}$. Указанные параметры передаются на мачту через четыре ролика каретки, расположенных в два ряда по вертикали и горизонтали.

Обозначим положительное значение силы при совпадении с направлением оси и отрицательным при встречном действии.

Расчет усилий от крутящего момента представлен на рис. 3.

На штангу со стороны вращателя действует крутящий момент M , на мачту через ролики вращателя действуют реакции, удерживающие каретку от вращения.

Момент для расчета реакций заменяем парой сил

$$F_{\text{м}} = M/b_{\text{кар}}, \quad (1)$$

$F_{\text{м}}$ распределяется на два ролика 1, 2 и на 3, 4. Усилие от одного ролика на мачту от крутящего момента

$$F_{1\text{м}} = F_{2\text{м}} = F_{\text{м}}/2 \quad (2)$$

$$F_{3\text{м}} = F_{4\text{м}} = -F_{\text{м}}/2 \quad (3)$$

Расчет усилий от усилия подачи

Точка приложения усилия подачи смещена от оси мачты, поэтому также будет действовать момент $M_{\text{п}}$

$$M_{\text{п}} = F_{\text{под}} * b_{\text{под}}, \quad (4)$$

Этот момент также будет действовать на 4 ролика, причем на ролики 1 и 4 в одну сторону, а на ролики 2, 3 – в другую.

$$F_{\text{п}} = M_{\text{п}} / h_{\text{кар}} \quad (5)$$

$$F_{2\text{п}} = F_{3\text{п}} = F_{\text{п}}/2 \quad (6)$$

$$F_{1\text{п}} = F_{4\text{п}} = F_{\text{п}}/2 \quad (7)$$

Расчет усилий от силы тяжести

Точка приложения силы тяжести смещена от оси мачты, поэтому также будет действовать момент MG

$$MG = (G_{\text{вр}} + Q) * b_{\text{вр}} \quad (8)$$

Этот момент также будет действовать на 4 ролика, причем на ролики 1 и 4 в одну сторону, а на ролики 2, 3 – в другую.

$$FG = MG/h_{\text{кар}} \quad (9)$$

$$F_{2\text{G}} = F_{3\text{G}} = FG/2 \quad (10)$$

$$F_{1\text{G}} = F_{4\text{G}} = -FG/2 \quad (11)$$

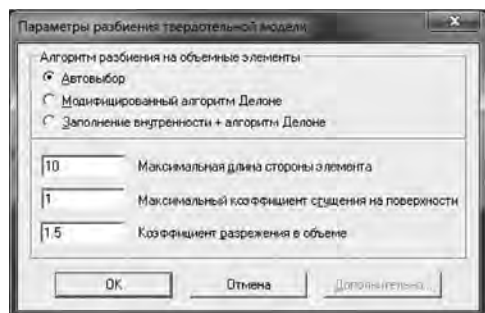


Рис. 7. Параметры разбиения на КЭС

Суммарные реакции от роликов на мачту

$$F_1 = F_{1м} + F_{1п} + F_1 G = M/2b_{кар} - M_{п}/2h_{кар} - MG/2h_{кар} \quad (12)$$

$$F_2 = F_{2м} + F_{2п} + F_2 G = M/2b_{кар} + M_{п}/2h_{кар} + MG/2h_{кар} \quad (13)$$

$$F_3 = F_{3м} + F_{3п} + F_3 G = -M/2b_{кар} + M_{п}/2h_{кар} + MG/2h_{кар} \quad (14)$$

$$F_4 = F_{4м} + F_{4п} + F_4 G = -M/2b_{кар} - M_{п}/2h_{кар} - MG/2h_{кар} \quad (15)$$

$$F_1 = 9677,419 - 24\,000 - 15\,750 = -30\,072,581 \text{ Н};$$

$$F_2 = 9677,419 + 24\,000 + 15\,750 = 49\,427,419 \text{ Н};$$

$$F_3 = -9677,419 + 24\,000 + 15\,750 = 30\,072,581 \text{ Н};$$

$$F_4 = -9677,419 - 24\,000 - 15\,750 = -49\,427,419 \text{ Н}.$$

При расчете объемных элементов после приложения сил, приступаем к разбиению модели на конечные элементы при помощи КЭС (рис. 7).

Генерация КЭС в APM Studio осуществляется в автоматическом режиме с использованием таких параметров, как максимальная длина стороны элемента; максимальный коэффициент сгущения на поверхности; коэффициент разрежения в объеме.

В качестве конечных элементов используются тетраэдры, и одним из наиболее важных этапов создания КЭС является правильный выбор размера тетраэдра — максимальной длины стороны элемента. Практически длина стороны элемента должна быть примерно в 2–4 раза меньше толщины самой тонкой детали в сборочном узле (рис. 8).

Максимальный коэффициент сгущения на поверхности — величина, характеризующая, во сколько раз при адаптивной

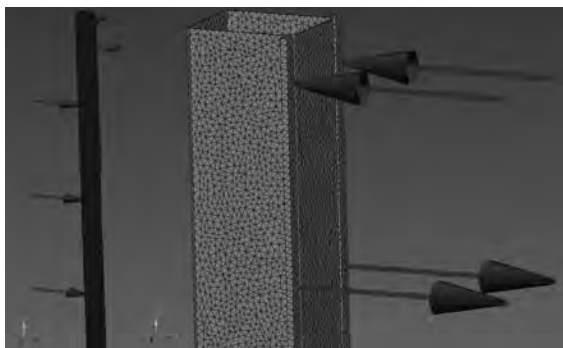


Рис. 8. КЭС модели мачты

разбивке будут уменьшены размеры конечных элементов, т.е. ограничение на минимальную сторону треугольника на поверхности. Коэффициент разрежения в объеме — степень уменьшения стороны тетраэдра при уходе вглубь объема твердотельной модели. Чем меньше — тем более одинаковыми становятся слои

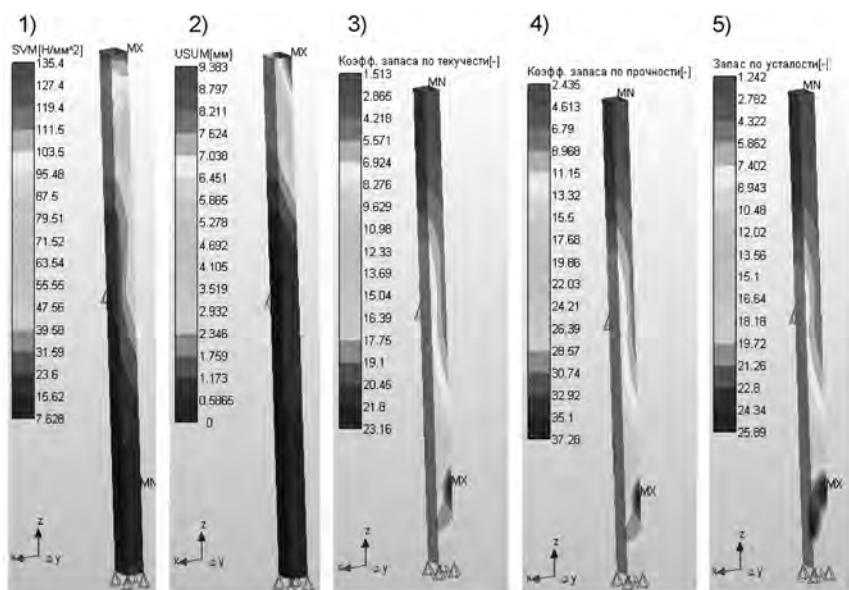


Рис. 9. Результаты расчетов конструкции мачты № 2 (расчетный случай 1.1): 1) карта напряжений, возникающих в мачте; 2) карта перемещений; 3) коэффициент запаса по текучести; 4) коэффициент запаса по прочности; 5) коэффициент запаса по усталости

Численные значения нагрузок

№ п/п	Нагрузки	Значения
1	Сила тяжести колонны, Н	50 000
2	Собственный вес, Н	4000
3	Крутящий момент привода, Н*м	2000
4	Давление ветра, МПа	0,000256

конечных элементов. Использование этих параметров позволяет сетке «адаптироваться» к сложной твердотельной модели в автоматическом режиме (рис. 8, рис. 9, мачта 2).

Получив КЭС модели, передаем ее в модуль APM Structure 3D с помощью step формата. Делается это для более удобного использования и ориентирования модели в зависимости от рассматриваемого расчетного случая.

На базе расчетных случаев составлены необходимые комбинации нагружения. Численные значения нагрузок определены с учетом расположения и крепления СП и приведены в таблице.

Для каждого типа профиля металлоконструкций мачты были составлены стержневые модели. В настоящей статье мы приводим результаты только одного расчетного варианта. Выбранный вариант расчета является показательным, так как результаты расчетов представленной модели мачты оказались близки к показателям нормальным и допустимым для работы и восприятия мачтой всех нагрузок действующих на нее.

Полученные результаты расчетов:

- напряжения в конструкции – 135,4 МПа;
- перемещения – 9,38 мм;
- коэффициент запаса по текучести – 1,55;
- коэффициент запаса по прочности – 2,43;
- коэффициент запаса по усталости – 1,24.

Таким образом, мы получили картину напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мачт различного сечения. Металлоконструкции мачт (см. рис. 2) представлены горячекатаным профилем (мачты № 1 и № 3) и гнутым профилем (мачты № 2, № 4, № 5, № 6, № 7).

Выводы

1. Расчеты показали, что при заданных нагрузках эквивалентные напряжения, возникающие в элементах металлоконструкции мачты буровой установки, не превосходят предела

текучести применяемых материалов, т.е. необходимая прочность обеспечивается. В наиболее неблагоприятном случае нагружения (комбинация нагружения 1) коэффициент запаса по пределу текучести равен 1,828 при допускаемом коэффициенте запаса $n = 1,5 \dots 1,7$.

2. Максимальные прогибы конструкции мачты, возникающие от внешних нагрузок, не превосходят допустимый предел. То есть необходимая жесткость несущего каркаса обеспечивается.

Расчет мачты проводился объемными конечными элементами, когда силовой привод находился в верхнем положении, а коэффициент запаса устойчивости составил 10,248.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замрий А.А.* Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D. — М.: Изд. АПМ, 2004. — 208 с.

2. *Шелофаст А.В., Чугунова Т.Б.* Основы проектирования машин. Примеры решения задач. — М.: Изд-во АПМ, 2004. — 240 с.

3. *Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др.* Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / Под общ. ред. А.С. Зубченко. — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.

4. SNIP 2.01.07-85*: Loads and effects.

5. *Абдулкаримов М.К.* Применение гнутого профиля в буровых установках / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 16–17 апреля 2015 г.), Екатеринбург: УГГУ, 2015. — С. 213–218.

6. *Абдулкаримов М.К.* Расчет базовой конструкции мачты буровой установки / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2016 г.), Екатеринбург: УГГУ, 2016. — С. 256–260.

7. *Hansen F.* Konstruktions wissenschaft-Crundlagen und Methoden. Berlin: VEB. Verlag, Technik, 1976. 165 s.

8. *Rodenaker W.G.* Methodisches konstruieren. Springer-Verlag: Berlin — Heidelberg — New York, 1970 — 223 s.

9. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for building. CEN. Ref. NO. ENV 1993-1-1: 1992 E. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Абдулкаримов Магомед Казбекович*¹ — аспирант,
e-mail: abdmg@list.ru,

*Саитов Виль Ирхужеевич*¹ — доктор технических наук,
профессор,

¹ Уральский государственный горный университет.

CALCULATION OF MAST RIG

The article deals with the calculation of the strength of the drilling mast mouth-Novki with all workloads. The analysis of stress-strain state of the mast rig. The calculation is to use the finite element method. A mathematical model for calculating the operating loads on the mast. The research for the masts of various designs and identified areas of maximum stress. Stress analysis is made in a dedicated APM WinMachine software package.

Completed example of the calculation of the proposed methodology for the exploration drilling rig. The algorithm of the proposed method includes the steps of creating a model form, anchorages, loadings. The task options and sections of material provided by the search parameters of rational masts.

Key words: strength, frame, rig drilling, drilling rig, finite element method, APM WinMachine.

AUTHORS

*Abdulkarimov M.K.*¹, Graduate Student, e-mail: abdmg@list.ru,

*Saitov V.I.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. Zamriy A. A. *Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktiv v srede APM Structure3D* (Finite element method-assisted design and calculation of 3D structures in APMStructure3D environment), Moscow, Izd. APM, 2004, 208 p.
2. Shelofast A. V., Chugunova T. B. *Osnovy proektirovaniya mashin*. Primery resheniya zadach (Machine design basis. Examples of problem solution), Moscow, Izd. APM, 2004, 240 p.
3. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V. *Marochnik staley i splavov*. 2-e izd., Pod red. A. S. Zubchenko (Grading of steels and alloys, 2nd edition, Zubchenko A. S. (Ed.)), Moscow, Mashinostroenie, 2003, 784 p.
4. SNIP 2.01.07-85*: Loads and effects.
5. Abdulkarimov M. K. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik trudov XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chleniya pamyati V. R. Kubacheka», provedennoy v ramkakh Ural'skoy gornopromyshlennoy dekady*, Ekaterinburg, 16–17 aprelya 2015 g. (Production Equipment for Mining and Petroleum Industries: Proceedings of XIII International Scientific–Technical Conference—V. R. Kubachek Memory's Lectures in the framework of the Ural Mining Decade, Ekaterinburg, April 16–17, 2015), Ekaterinburg, UGGU, 2015, pp. 213–218.
6. Abdulkarimov M. K. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik trudov XIV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chleniya pamyati V. R. Kubacheka», provedennoy v ramkakh Ural'skoy gornopromyshlennoy dekady*, Ekaterinburg, 07–08 aprelya 2016 g. (Production Equipment for Mining and Petroleum Industries: Proceedings of XIV International Scientific–Technical Conference—V. R. Kubachek Memory's Lectures in the framework of the Ural Mining Decade, Ekaterinburg, 07–08 April 2016), Ekaterinburg, UGGU, 2016, pp. 256–260.
7. Hansen F. *Konstruktions wissenschaft-Crundlagen und Methoden-Berlin*: VEB. Verlag, Technik, 1976. 165s.
8. Rodenaker W. G. *Methodisches konstruieren*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, 1970 223 s.
9. *Eurocode 3: Design of steel structures*. Part 1.1: General rules and rules for building. CEN. Ref. NO. ENV 1993-1-1: 1992 E.