

минимальной удельной потребляемой мощности для различных оборотов ротора дробилки.

3. Сравнив оптимальные значения, полученные экспериментальным путем, с опытными данными, можно сделать заключение о том, что модель адекватно и достоверно описывает процесс дробления и в дальнейшем может быть включена в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпургалов, Ю. А. Компьютерное моделирование принятия решений в производственных задачах / Ю. А. Шпургалов. – Минск: БНТУ, 2009. – 217 с.

2. Выполнить исследования и провести опытно-промышленные испытания замкнутого цикла дробления калийной руды на 4-м РУ с использованием различных типов дробилок и модернизированного грохота ГИТ-71М с целью улучшения грансостава дробленого продукта: отчет о НИР / ОАО «Белгорхимпром»; рук. В. В. Сапешко. – Минск, 2007. – 56 с. – № ГР 400.В.2005–2006.

Поступила 10.10.2012

УДК 539.3/6 (076.5)

## ТЕСТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОМПАКТНОГО МЮОННОГО СОЛЕНОИДА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Кандидаты техн. наук ЛАРЧЕНКОВ Л. В.<sup>1)</sup>, ПРОТАСЕНЯ О. Н.<sup>1)</sup>, инж. ПРОТАСЕНЯ И. О.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,  
<sup>2)</sup>ОАО «АМКОДОР» – управляющая компания холдинга»

ОАО «МЗОР» – управляющая компания холдинга «Белстанкоинструмент» изготовлены детали компактного мюонного соленоида (КМС) для большого адронного коллайдера (БАК) по заказу Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария). Коллайдер – устройство, в котором производится разгон протонов водорода до скорости света и столкновение их в КМС, где происходит измерение энергий и фотографирование образовавшихся частиц [1, 2].

Исследования проводятся учеными, которые должны дать ответ на интригующий вопрос физики о Вселенной. Откуда у тел возникает масса? Ученые пытаются отследить распад бозона «хиггса» на мюоны, считающиеся последними недостающими элементами современной теории элементарных частиц стандартной модели, образующиеся в результате столкновений встречных пучков, например «протон – протон» водорода. Эти гипотетические частицы отвечают за массы всех других частиц.

Пучки протонов, введенные в коллайдер, направляют навстречу друг другу. Образование новых частиц в КМС фиксируют кремниевые микроскопы и два калориметра: электромагнитный и адронный. Первый измеряет энергии электронов, позитронов и фотонов, второй – протонов, нейтронов, пионов и других тяжелых частиц. Мюоны свободно проходят через оба калориметра, поэтому пропорциональные камеры для их регистрации установлены вне соленоида.

В БАКе установлен самый мощный в мире сверхпроводящий электромагнит, энергия магнитного поля которого составляет 3 ГДж, а величина магнитной индукции – 4 Тл. С учетом этих условий проведено тестирование основных деталей КМС на кафедре «Сопrotивление материалов машиностроительного профиля» БНТУ методом неразрушающего контроля.

Всякое изготавливаемое изделие – конструкция, сооружение – имеет целенаправленное назначение. Полнота осуществления назначения определяет нормальные условия исполь-

зования этого изделия. Невыполнение назначения приводит к отказам в его эксплуатации. Частота отказов за время эксплуатации характеризует надежность изделия. Для достижения этой цели было проведено тестирование 18 основных несущих узлов КМС с расчетной нагрузкой в 1000 кН на универсальной испытательной машине. Конструкция представляет собой раму замкнутого контура, нагруженную посередине ригеля силой  $2F = 1000$  кН. Материал: сталь 03Х20Н16АГ6. Проверить надежность и геометрические размеры сечений стержней, полученных инженерным расчетом, а также допускаемых напряжений стержнями рамы  $[\sigma] = 216\text{--}440$  МПа; размеры стержней:  $AD = a = 434$  мм;  $AB = 2c = 894$  мм;  $A_1 = 7074$  мм<sup>2</sup>;  $A_2 = 9600$  мм<sup>2</sup>;  $A_3 = A_4 = 5640$  мм<sup>2</sup>;  $A_5 = 11760$  мм<sup>2</sup>. Жесткость всех стержней рамы одинакова:  $EI = \text{const}$ .

Расчетная схема рамы представлена на рис. 1, на рис. 1б – схема с условным сечением стержня в точке С и заменой внешней силы  $F$  силами внутренних напряжений  $Q$ ,  $N$  и моментом  $M$ . Для расчета данная схема является два раза статически неопределимой. Так как рама симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через точку С, выбираем схему расчета (рис. 2), используя из математического анализа систему канонической корреляции.

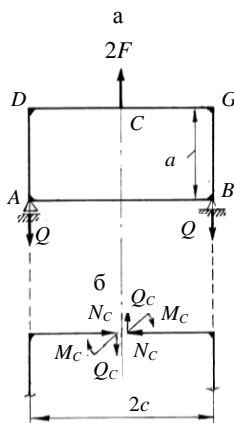


Рис. 1. Основная расчетная схема

В теории канонической корреляции случайные (неизвестные) величины  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  и т. д. линейно преобразуются в так называемые канонические случайные величины  $M$ ,  $N$ ,  $Q_C$  такие, что любая величина из первого множества коррелируется лишь с одной величиной второ-

го множества. Для сохранения прежних условий работы рамы прикладываем в этом сечении усилия: изгибающий момент  $M$ , продольную силу  $N$ , поперечную силу  $Q_C$  (рис. 2а).

В силу симметричности поперечная сила  $X_3 = Q_C = 0$ . На рис. 2а представлены левая половина рамы (слева от точки С) и передающиеся усилия от правой части рамы, которые обозначим  $X_1 = M_C = M$  и  $X_2 = N_C = N$ . В нижнем сечении усилия не показываем, так как они не войдут в уравнения изгибающих моментов.

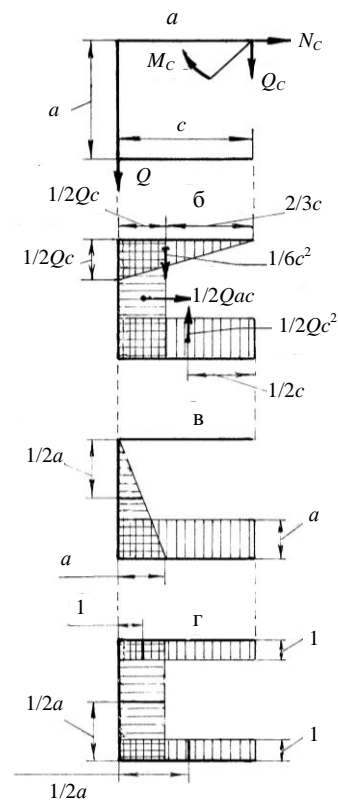


Рис. 2. Построение эпюр сил и изгибающих моментов

Условия: горизонтальная деформация  $\Delta_C^{\text{гор}} = 0$  и угол поворота сечения  $\theta_C = 0$ , при которых схема будет эквивалентна расчетной схеме.

Такие системы чаще всего рассчитывают по методу сил. В качестве неизвестных выбирают силы, действующие по направлению удаленных связей.

Уравнения перемещений записываем в канонической форме:

$$\Delta_{NQ} + N\delta_{NN} + M\delta_{NM} = 0;$$

$$\theta_{MQ} + N\delta_{MN} + M\delta_{MM} = 0,$$

где  $\Delta_{NQ}$  – перемещение точки приложения первого лишнего неизвестного по собственному

направлению, вызванное силой  $Q$ ;  $N\delta_{NN}$  – произведение, представляющее перемещение точки приложения первого лишнего неизвестного по собственному направлению, вызванному силой  $N$ ;  $M\delta_{NM}$  – произведение, представляющее перемещение точки приложения первого лишнего неизвестного по тому же направлению, вызванное моментом  $M$ .

Левая часть первого уравнения представляет собой суммарное перемещение точки приложения силы  $N$  по направлению этой силы, вызванное всеми силами. Второе уравнение выражает суммарное перемещение точки приложения момента  $M$  по направлению его действия, вызванное всеми силами. Член  $\theta_{MQ}$  – перемещение в том же месте и по направлению его действия, вызванное силой  $Q$ .

Для рамы, состоящей из прямолинейных элементов, перемещения  $\Delta$ ,  $\theta$ ,  $\delta$  удобно вычислять по системе канонической корреляции. На расчетной схеме левой половины рамы нанесем все действующие на нее силы  $Q$ ,  $M$ ,  $N$ . Построим эпюры изгибающего момента от силы  $Q = F$  (рис. 2б), от нормальной единичной силы  $N^0 = 1$  (рис. 2в), и от единичного изгибающего момента  $M^0 = 1$  (рис. 2г).

Пользуясь построенными эпюрами, вычисляем произведение  $\omega M^0$  (площадь силовой эпюры, умноженной на ординату единичной):

$$\Delta_{NQ} = -\frac{Fca}{2} \frac{a}{2} - \frac{Fc^2}{2} a = -\frac{Fca}{4} a - 2c ;$$

$$\theta_{MF} = -\frac{Fc^2}{6} 1 - \frac{Fca}{2} 1 - \frac{Fc^2}{2} 1 = -\frac{Fc}{6} 3a + 4c ;$$

$$\delta_{MN} = \delta_{NM} = \frac{a}{2} a \cdot 1 + ac \cdot 1 = \frac{a}{2} a + 2c ;$$

$$\delta_{NN} = \frac{a}{2} a \frac{2}{3} a + aca = \frac{a^2}{3} a + 3c ;$$

$$\delta_{MM} = 1 \cdot c \cdot 1 + 1 \cdot a \cdot 1 + 1 \cdot c \cdot 1 = a + 2c.$$

Подставим вычисленные значения суммы произведений  $\omega M^0$  в канонические уравнения:

$$N \frac{a^2}{3} a + 3c + M \frac{a}{2} a + 2c = \frac{F_A c a}{4} a + 2c ;$$

$$N \frac{a}{2} a + 2c + M a + 2c = \frac{F_A c}{6} 3a + 4c .$$

Решив эти уравнения, получим:

$$N = \frac{2Fc}{a a + 6c} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 0,447^2}{0,434 \cdot 0,434 + 6 \cdot 0,447} = 148 \text{ кН};$$

$$M = \frac{Fc}{6} \frac{3a^2 + 16ca + 12c^2}{a^2 + 8ca + 12c^2} =$$

$$= 37,25 \cdot \frac{3 \cdot 0,434^2 + 16 \cdot 0,447 \cdot 0,434 + 12 \cdot 0,447^2}{0,434^2 + 8 \cdot 0,447 \cdot 0,434 + 12 \cdot 0,447^2} =$$

$$= 54,6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Величина изгибающего момента в верхнем левом углу рамы

$$M_D = M - \frac{Fc}{2} = 54,6 - \frac{500 \cdot 0,447}{2} =$$

$$= 54,6 - 111,75 = -57,15 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Величина момента в нижнем левом углу рамы

$$M_A = M_D + Na = -57,15 + 148 \cdot 0,434 =$$

$$= -7,08 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Эпюры  $Q$ ,  $M$  и  $N$  построены на рис. 3.

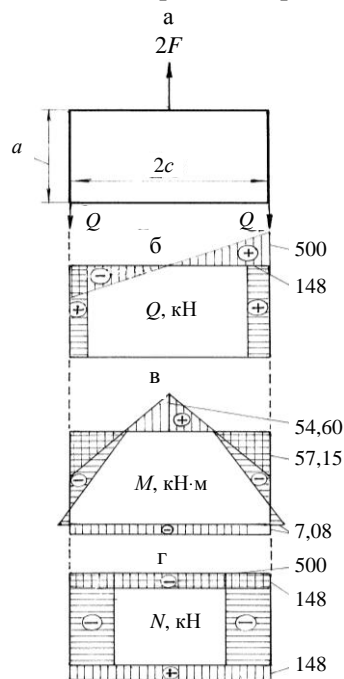


Рис. 3. Расчет и построение эпюр  $Q$ ,  $M$  и  $N$

Для определения прогиба сечения  $C$  рассмотрим стержень  $DG$  как балку с действующей на ее середину силой  $2F = 1000$  кН. Изгибающий момент на опоре  $G$  будет  $M_G = 57,15$  кН·м. Изгибающий момент в точке  $C$  получим

$$M_C = M + M_D = 54,6 + 57,15 = 111,75 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Прогиб балки в точке  $C$  определяем из условия, что основная расчетная схема состоит из нагрузки  $2F$ , моментов на опорах  $M_D = -57,15 \text{ кН}\cdot\text{м}$  и реакций

$$F = Q = -500 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент в левом нижнем углу

$$M_A = M_D + Na = -57,15 + 148 \cdot 0,434 = -57,15 + 64,23 = 7,08 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

С этими параметрами строим эпюры изгибающих моментов и под ними эпюру изгибающего момента от силы  $F^0 = 1 \text{ кН}$ , приложенной в сечении  $C$  (рис. 4). Половины площадей первых двух эпюр будут равны:

$$\omega_1 = 1/2(M + M_D)c = 0,5 \cdot (55 + 57) \cdot 0,447 = 25 \text{ кН}\cdot\text{м}^2;$$

$$\omega_2 = 57 \cdot 0,447 = 25,5 \text{ кН}\cdot\text{м}^2.$$

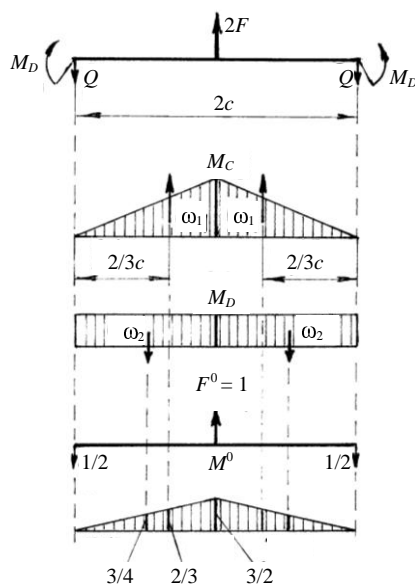


Рис. 4. Расчет ригеля рамы для определения площади сечения

Ординаты эпюр единичных моментов, соответствующие положениям центров тяжести первых двух эпюр, равны:

$$M_1^0 = 3/3 \text{ м и } M_2^0 = 3/4 \text{ м}.$$

Сумма произведений  $\omega M^0$  получится

$$2(25 \cdot 1 - 25,5 \cdot 0,75) = 11,75 \text{ кН}\cdot\text{м}^3.$$

Искомый прогиб составит

$$y_c = \frac{11,75 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^5 \cdot 512 \cdot 10^2} = 1,2 \text{ мм}.$$

Определим размеры прямоугольного поперечного сечения ригеля рамной конструкции. Отношение сторон  $h:b = 1$ . Наибольшие растягивающие силы  $N$  и изгибающий момент  $M$  возникнут в нижней точке сечения.

Геометрические характеристики сечения выразим через размер  $b$ :

$$A = bh = b^2; W_y = 1/6bh^2.$$

Условие прочности материала в точке, наиболее удаленной от осей  $x, z$ , имеет вид

$$\sigma = N/A + M_y/W_y = 14800/b^2 + 5500 \cdot 10^2 \cdot 6/b^3 \leq 3900 \text{ Н/см}^2.$$

Преобразуем данное выражение для определения величины  $b$ :  $3900b^3 - 14800b - 3300000 = 0$  или  $b^3 - 3,79b - 846 = 0$ ; при решении находим  $b = 9,6 \text{ см}$ , тогда  $A = 92,16 \text{ см}^2$ , что меньше площади  $A_3 = 96 \text{ см}^2$ .

Прочностные качества стержней рамной конструкции выполнены.

Проведенное тестирование основных несущих нагрузку элементов конструкции компактного мюонного соленоида на основании начальных условий (исходных данных) – растягивающих и сжимающих усилий, создаваемых сильным электромагнитным полем, – показало надежность данной конструкции при эксплуатации в заданном режиме. Режим создания нагрузки циклический: нагрузка – выдержка – разгрузка. В каждом последующем цикле нагрузка увеличивается. Предельная расчетная величина нагрузки, при которой возможно появление остаточной деформации, 280 кН.

Закон Гука, связывающий напряжения и деформации линейной зависимостью, а также и нелинейные зависимости исключают из закона деформации важную в эксплуатации конструкции независимую переменную величину – время. Величина деформации для большинства материалов не остается постоянной при постоянной во времени нагрузке, а при постепенном нарастании нагрузки деформация зависит от скорости увеличения нагрузки. Подобное явление наблюдается при циклической или вибрационной нагрузке несущих деталей конструкции.

Связь между напряжениями в материале, деформациями деталей и временем не является функциональной и выражается в дифференциальной или интегральной форме [3]. Простейшая форма закона деформирования во времени установлена для идеально вязкой жидкости, в которой внутренние напряжения пропорциональны скорости деформации

$$\sigma = k \frac{d\varepsilon}{dt},$$

где  $k$  – коэффициент вязкости или внутреннего сопротивления, пропорционального скорости деформации.

Материал деталей конструкции следует рассматривать как неоднородный, состоящий из частиц, одни из которых обладают свойством вязкости и подчиняются дифференциальной зависимости, а другие – упругие, подчиняющиеся закону Гука.

Если принять значения относительной деформации  $\varepsilon$  в обоих уравнениях одинаковыми и разделить напряжения  $\sigma_v$  – вязкие и  $\sigma_u$  – упругие, то общее напряжение будет равно сумме  $\sigma = \sigma_v + \sigma_u$ .

Подставив в это уравнение значения символов  $\sigma_v$  и  $\sigma_u$ , получим

$$\sigma = k \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon.$$

Данное уравнение представляет собой закон, дающий более сложную зависимость между напряжением и деформацией, чем закон Гука.

Если принять, что закон изменения напряжений во времени задан, то получим из решения этого уравнения относительно величины  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{E}{k}} + \frac{1}{k} \int_{t_0}^t \sigma \tau e^{-\frac{E}{k} t - \tau} d\tau.$$

Если представить, что начальное время находится в бесконечности с минусом, то началь-

ной деформацией  $\varepsilon_0$  можно пренебречь. Тогда получим

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \int_{-\infty}^t \sigma \tau e^{-\frac{E}{k} t - \tau} d\tau.$$

В таком виде формула учитывает все изменения нагрузки, которые происходили до рассматриваемого момента времени  $t$ .

## ВЫВОДЫ

1. В существующих методах расчета конструкций и сооружений на прочность исходят из очень простых схем работы материала в эксплуатации, используя линейную зависимость между напряжениями и деформациями.

2. Практика показывает, что не для всех материалов и условий их работы эти методы применимы, так как формулы для расчета напряжений не учитывают фактор времени.

3. Особенно необходим учет времени при длительной стационарной, знакопеременной и вибрационной внешних нагрузках, при которых материал деформируется во времени без увеличения напряжений.

4. Приведенные формулы деформации с учетом времени легко преобразуются, если принять в них:  $\sigma = \text{const}$  или  $\sigma = \nu t$ .

5. КМС находится в эксплуатации безотказно более десяти лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Научно-исследовательские** работы по изучению упруго-пластических свойств материалов рам адронного калориметра установки CMS: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. Л. В. Ларченков; исполн.: Р. В. Стефанович [и др.]. – Минск, 2001. – 45 с. – ГР № 15 / 11-01.
2. **Сотрудничество** ОИЯИ с институтами, университетами и предприятиями Белоруссии // Материалы Ученого совета. – Дубна, 2002. – 84 с.
3. **Ржаницин, А. Р.** Теория ползучести / А. Р. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1968. – 416 с.

Поступила 26.08.2012