

УДК 622.1:622.271.4

А.А. Шоломицкий /д.т.н./, А.Л. Сотников /к.т.н./

Донецкий национальный технический университет (Донецк, Украина)

В.М. Нагорный /к.т.н./, В.В. Нагорный

Сумской государственной университет (Сумы, Украина)

Т.Г. Николаева /к.т.н./

Днепропетровский национальный горный университет (Днепропетровск, Украина)

Н.В. Малеев /к.т.н./

ГП "Донецкий экспертно-технический центр" (Донецк, Украина)

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ, ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Розглядаються результати маркшейдерських спостережень за деформаціями металоконструкцій транспортно-відвального мосту фотограмметричним методом та електронним безвідбивним тахеометром. Виконано аналіз стану транспортно-відвального мосту за оригінальною методикою та виявлені вузли, що вимагають додаткового обстеження і посилення. Виконано прогноз строку експлуатації транспортно-відвального мосту.

Рассматриваются результаты маркшейдерских наблюдений за деформациями металлоконструкций транспортно-отвального моста фотограмметрическим методом и электронным безотражательным тахеометром. Выполнен анализ состояния транспортно-отвального моста по оригинальной методике и выявлены узлы, требующие дополнительного обследования и усиления. Выполнен прогноз срока эксплуатации транспортно-отвального моста.

На горных предприятиях Украины работает много крупногабаритного подъемно-транспортного оборудования: транспортно-отвальные мосты, роторные экскаваторы, драглайны, отвалообразователи, конвейеры, мостовые, козловые и консольные краны и т.п. Контроль за деформациями металлоконструкций данного оборудования возложен на маркшейдерскую службу предприятия, которая обязана 2 раза в год выполнять съемку и определять деформации металлоконструкций оборудования [1, п.8.2.4] фотограмметрическим способом. В современных реалиях этот пункт инструкции требует редакции. Фотограмметрическая съемка не обеспечивает высокой точности измерений, она не позволяет получить полную картину деформаций конструкции – по данным фотограмметрической съемки нельзя определить деформации в горизонтальной плоскости, правильно определить угол закрутки и т.д. Но самое главное – инструкция [1] не дает никаких критериев для оценки технического состояния и прогнозирования срока эксплуатации подъемно-транспортного оборудования.

Экспертную оценку технического состояния оборудования можно выполнить согласно мето-

дики [2], которую можно применять не только к мостовым кранам, но и к козловым и полукозловым и консольным кранам. Такая оценка обязательна для оборудования, которое отработало свой ресурс, и проводится она должна регулярно, каждые 2...3 года.

Многое из подъемно-транспортного оборудования, эксплуатируемого на горных предприятиях, можно диагностировать по этой методике. Однако ее применение связано с некоторыми ограничениями – оборудование должно быть остановлено на время выполнения экспертной оценки и специальным образом подготовлено, но в большинстве случаев подъемно-транспортное оборудование являются машинами непрерывного действия. С него должна быть удалена пыль, грязь, остатки смазки и т.д. – все то, что мешает визуальному контролю за состоянием металлоконструкций. Само обследование проводится зачастую на большой высоте, в опасных условиях для исполнителей. К тому же, многие геометрические параметры подъемно-транспортного оборудования не могут быть достоверно определены с помощью этой методики [2]. Например, в закрытых помещениях можно натянуть струну и измерить прогиб балок мосто-

вого крана длиной 20...25 метров, но под открытым небом нельзя этим способом измерить прогиб фермовой балки транспортно-отвального моста длиной 300 метров.

Возникает некоторое противоречие, с одной стороны имеются регулярные маркшейдерские измерения – но они не дают никакой оценки технического состояния оборудования и прогноза по его дальнейшему изменению. С другой стороны, имеется методика экспертной оценки, которая позволяет выполнить оценку состояния оборудования, но ее применение для подъемно-транспортного оборудования сопряжено с трудностями и к тому же вызовет довольно продолжительную его остановку.

Поэтому создание методов экспресс оценки технического состояния подъемно-транспортного оборудования по данным маркшейдерских наблюдений и выявление узлов с большой степенью износа является актуальной задачей, как и совершенствование маркшейдерских методов наблюдения за деформациями крупногабаритных металлоконструкций оборудования.

Целью данной работы является рассмотрение варианта решения этих задач на примере маркшейдерских наблюдений за деформациями транспортно-отвального моста на разрезе "Морозовский" ОАО "Александрияуголь" (Александрия, Украина).

Фотограмметрический способ наблюдений

Фотограмметрический способ наблюдений за деформациями крупногабаритного подъемно-транспортного оборудования известен давно [3,4] и с тех пор практически не изменился.

Организация работ по наблюдению за деформациями металлоконструкций транспортно-отвального моста была начата в июле 1971 г. До начала фотограмметрических наблюдений произведена маркировка узлов главных ферм (рисунок 1).

При съемке главных ферм фотостанции располагались с левой и правой стороны главной фермы. Из-за большой длины главных ферм (297,7 м) минимальные отстояния съемки при этом составляли 400...420 м. Во многих случаях

по ряду причин фотостанции приходилось располагать на отстоянии до 550...600 м, что отрицательно сказывалось на точности результатов наблюдений.

При фотограмметрических наблюдениях применялась камера "Foteo 19/1318" фирмы "Карл Цейс Иена" (Германия). Оптическая ось фотокамеры при съемке устанавливалась перпендикулярно плоскости исследуемых элементов с помощью зрительной трубы ориентирующего устройства фототеодолита и соответствующих металлоконструкций моста.

Для контроля и повышения точности результатов фотограмметрических наблюдений исследуемых элементов, металлоконструкции моста фотографировались с каждой фотостанции на 2...3 фотоснимка. Для измерения снимков использовались стереокомпараторы 1818 той же фирмы.

Величины прогибов узлов главных ферм и других металлоконструкций моста в каждом цикле наблюдений вычислялись по результатам измерения на стереокомпараторе 2-х...3-х снимков с учетом масштабов их фотографического изображения. При определении величин прогибов узлов главных ферм снимки, на стереокомпараторе ориентировались по маркам на узлах №7 и №20 (рисунок 1) верхних поясов ферм. Таким образом, полученные на момент каждой съемки прогибы верхних и нижних узлов главной фермы отсчитывались от линии проходящей через центры марок №7 и №20 верхних поясов фермы с левой и правой стороны. Изменения указанных прогибов во времени позволяют судить о деформациях в металлоконструкциях главной фермы транспортно-отвального моста.

При расчете ожидаемой точности определения деформаций в металлоконструкциях машин фотограмметрическим способом по одиночному снимку следует исходить из выражений:

$$m_{\Delta X} = M \cdot m_{\Delta x}, \quad m_{\Delta Z} = M \cdot m_{\Delta z},$$

где $m_{\Delta X}$ и $m_{\Delta Z}$ – среднеквадратические погрешности определения величины деформаций на ис-



Рисунок 1 – Схема маркировки узлов главной фермы транспортно-отвального моста

Таблица 1 – Предварительный расчет погрешности определения величин деформаций металлоконструкций фотограмметрическим методом

Отстояние съемки, м	Масштаб фотографического изображения	Среднеквадратические погрешности определения деформаций, мм		
		по 1-му снимку	по 2-м снимкам	по 3-м снимкам
50	1:250	±1	±0,7	±0,6
100	1:500	±2,1	±1,5	±1,2
200	1:1000	±4,2	±3	±2,4
300	1:1500	±6,3	±4,5	±3,6
400	1:2000	±8,4	±5,9	±4,8
500	1:2500	±10,5	±7,4	±6,1
600	1:3000	±12,6	±9,9	±7,4

следуемом объекте, соответственно вдоль и перпендикулярно объекту; $m_{\Delta x}$ и $m_{\Delta z}$ – среднеквадратические погрешности измерения деформаций на снимке, соответственно вдоль и перпендикулярно объекту; M – масштаб изображения.

При съемке фотокамерой "Foteo 19/1318" с фокусным расстоянием около 200 мм точность определения величин деформаций металлоконструкций фотограмметрическим методом характеризуется погрешностью, приведенной в таблице 1.

Для контроля и повышения точности измерения, наблюдения каждой точки объекта производится трехкратным наведением измерительной марки прибора.

Однако при всех своих достоинствах, фотограмметрический способ достаточно трудоемкий и не позволяет получить результаты измерений непосредственно в поле. Измерения и фотолабораторная обработка занимают 1...2 рабочих дня. К тому же фотограмметрические измерения не позволяют определить деформации транспортно-отвального моста в горизонтальной плоскости, углы закрутки ферм и другие параметры деформаций, которые возникают в процессе его эксплуатации. К тому же такая методика съемки не позволяет связать измерения левой и правой стороны ферм в единой системе координат, а, следовательно, по таким измерениям нельзя достоверно определить угол закрутки ферм. Чтобы определять все три координаты на контрольных точках необходимо изменить методику фотограмметрических измерений – для этого необходимо фотографирование производить с нескольких базисов с каждой стороны транспортно-отвального моста и выполнять обработку в стереоскопическом режиме. Такая технология повысит трудоемкость как полевых, так и камеральных работ в 2...3 раза.

Способ наблюдений электронным тахеометром

Для преодоления недостатков фотограмметрического метода в декабре 2007 г. была выпол-

нена экспериментальная съемка транспортно-отвального моста электронным безотражательным тахеометром "SET33R" фирмы "Sokkia" (Япония) [5], который позволяет измерять горизонтальные и вертикальные углы с точностью 3", точность измерения расстояний ±3мм+2ppm. В безотражательном режиме им можно измерять расстояния до 350 метров.

Во время измерений тахеометр располагался на вскрышном уступе, примерно в 250 метрах от транспортно-отвального моста. Было измерено 29 точек левой стороны главной фермы моста.

Проведенные измерения показали, что с помощью электронного тахеометра, можно выполнить измерения транспортно-отвального моста и определить его деформации с необходимой точностью. Для этого были разработаны различные схемы измерений [6]. Причем эти измерения являются более точными и информативными, чем традиционная фотограмметрическая съемка и выполняются за более короткое время (3...4 часа). По данным измерений можно не только вычислить угол закрутки фермовой балки транспортно-отвального моста, но и определить отклонение формы поперечного сечения балки от проектного (рисунок 2). Измерения левой и правой стороны фермы транспортно-отвального моста обязательно должны быть связаны общими точками измерений, это позволит вычислить координаты контрольных точек в единой системе координат.

Предварительный расчет точности показал, что максимальная ошибка определения координат маркированных точек не будет превышать 5 мм.

Данный метод съемок, со связующими точками, можно применить к широкому кругу крупногабаритного оборудования. Кроме того, его можно применить для монтажа этого оборудования, т.к. измерения в online-режиме с помощью программного комплекса "Визир 3D" [8] позволяют получить результаты в поле сразу после окончания измерений.

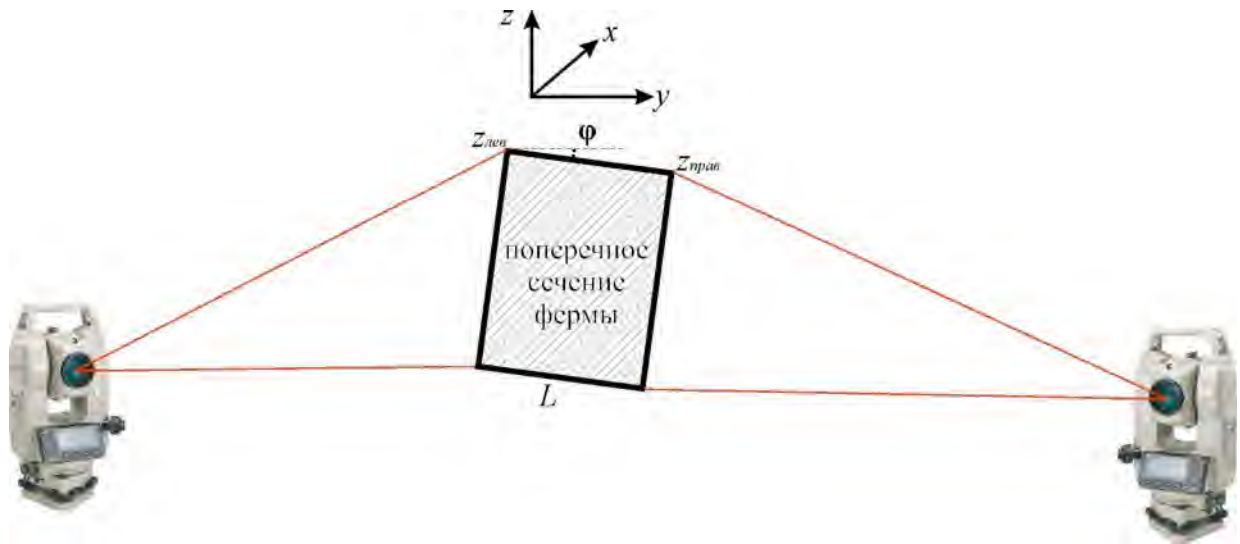


Рисунок 2 – Измерение формы поперечного сечения и угла закрутки фермы транспортно-отвального моста: $Z_{лев}$ и $Z_{прав}$ – отметка верхнего пояса, соответственно на левой и правой стороне фермы; L – ширина пояса; φ – угол закрутки

Метод экспресс оценки состояния транспортно-отвального моста

Целью экспресс оценки является прогнозирование остаточного ресурса и определение степени критичности текущего состояния металлоконструкции транспортно-отвального моста.

Предметом экспресс оценки является транспортно-отвальный мост (рисунок 1) ориентировочно изготовленный в 1937 г. в Германии и представляющий собой ферменную конструкцию, состоящую из двух частей (главных ферм) – двухопорной и консольной. Длина двухопорной части равна 186,5 м, консольной – 111,2 м, ширина ферм – 9 м.

Метод экспресс оценки заключается в определении по данным маркшейдерских измерений характера изменений за время эксплуатации моста деформации (стрелы прогиба и угла закручивания) его фермы и времени нарастания деформаций до недопустимой степени для прогнозирования ресурса транспортно-отвального моста.

Стрела прогиба моста определялась на левой и правой стороне фермы по следующим формулам:

$$\Delta_{лев} = \frac{Z_{лев}}{L_{ПР}}, \Delta_{прав} = \frac{Z_{прав}}{L_{ПР}},$$

где $L_{ПР}$ – длина пролета фермы.

Угол закручивания ферм оценивался по формуле:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{Z_{лев} - Z_{прав}}{L}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}.$$

Наработка моста (t) на момент каждого освидетельствования рассчитывалась, начиная с 1972 г. В качестве текущей даты для правой стороны и узлов с 4-го по 1-й на левой стороне принималась дата 04.04.05 г., для узлов с 5-го по 19-й на левой стороне – 21.12.07 г.

Прогноз ресурса транспортно-отвального моста осуществлялся в виде временного интервала:

$$T_{ПР} = T_{НГ} \dots T_P,$$

$$T_{НГ} = Q \cdot t + P \cdot T_P,$$

$$P = \exp\left(-\frac{t}{T_P}\right), Q = 1 - P,$$

где T_P – прогноз наработки моста до ремонта (снятия моста с эксплуатации); $T_{НГ}$ – нижняя граница интервала, определялась как среднестатистическое значение наработки моста t на момент текущего обследования его состояния и прогнозируемого времени T_P ; P и Q – соответственно, надежность и вероятность разрушения моста в районе его подконтрольных узлов.

Верхняя граница интервала T_P определялась по результатам аппроксимации данных, характеризующих изменение с течением времени деформаций ферм моста в каждом из их подконтрольных узлов (рисунок 1). Аппроксимация проводилась графиком аналитической зависимости, отражающей механику разрушения металлов [7].

Время упреждения прогноза параметра T_P было принято равным сроку эксплуатации моста, по которому имеются данные о деформации его ферм. Для правой стороны и узлов с 4-го по

I-й на левой стороне время упреждения равнялось $T_{\text{УП}}=04.04.2005 \text{ г.}-1972 \text{ г.}=33,26 \text{ лет}$, а для узлов с 5-го по 19-й на левой стороне – $T_{\text{УП}}=21.12.2007 \text{ г.}-1972 \text{ г.}=35,94 \text{ лет}$.

Искомый остаточный ресурс $T_{\text{ОСТ}}$ также представлялся в виде интервала:

$$\begin{aligned} T_{\text{ОСТ}} &= T_{\text{ОСТ.НГ}} \dots T_{\text{ОСТ.ВГ}}, \\ T_{\text{ОСТ.НГ}} &= T_{\text{ОСТ.НГ}} - t, \\ T_{\text{ОСТ.ВГ}} &= T_{\text{ОСТ.ВГ}} - t. \end{aligned}$$

Степень критичности текущего технического состояния моста оценивалась в зависимости от величины классифицирующей функции $F_k(A_{\text{ОТН}}, V_{\text{ОТН}})$, аргументами которой являются степень $A_{\text{ОТН}}$ и относительная скорость $V_{\text{ОТН}}$ изменения с течением времени деформации (стрелы прогиба) с левой и правой стороны верхнего пояса главных ферм моста:

$$\begin{aligned} F_k &= \alpha \cdot A_{\text{ОТН}} + (1 - \alpha) \cdot V_{\text{ОТН}}, \\ A_{\text{ОТН}} &= \frac{A - A_1}{[A]_{\text{ПР}} - A_1}, \quad V_{\text{ОТН}} = \frac{T_{\text{РЕС}} - t_1}{T_{\text{Р}} - t_1}, \end{aligned}$$

где A и A_1 – значение деформации, зафиксированное соответственно при текущем и первоначальном обследовании моста; $[A]_{\text{ПР}}$ – предельное, согласно действующим нормам, значение деформации; $T_{\text{РЕС}}$ – плановая наработка моста до

снятия с эксплуатации (время календарное); t_1 – наработка моста на момент его первоначального освидетельствования (время календарное); α – весовой коэффициент (изменяется от нуля до единицы)

В расчетах принималось, что $T_{\text{РЕС}}$, равнялось удвоенному времени регулярного контроля за техническим состоянием моста, т.е. – 72 годам.

Схема размещения контрольных точек (узлов) показана на рисунке 1. В зависимости от величины классифицирующей функции F_k состояние моста в каждой из контрольных точек относилось к одному из 4-х классов состояния (таблица 2).

Результаты анализа состояния моста в каждом из подконтрольных узлов, расположенных на левой и правой сторонах ферм, оформлялись Протоколом.

Результаты экспресс оценки приведены на рисунках 3...9. На рисунках 3 и 4 показаны распределение вдоль ферм соответственно величины стрел прогиба и угла закручивания, имевших место в 1972 и 2005 г.г. На рисунках 5 и 6 показаны, соответственно, примеры аппроксимации фактических данных о прогибах в узлах, находящихся в отличающихся технических состояниях. На рисунке 7 приведен пример Протокола, описывающего состояние моста в узле, техническое состояние которого определено, как требующее дополнительного обследования. На

Таблица 2 – Диапазоны изменения классифицирующей функции F_k и соответствующее им техническое состояние подконтрольных узлов моста

Диапазон изменения классифицирующей функции F_k	Класс технического состояния
$0 < F_k \leq 0,42$	"Хорошее"
$0,42 < F_k \leq 0,63$	"Удовлетворительное"
$0,63 < F_k < 1,0$	"Требуется дополнительное обследование"
$1,0 \leq F_k$	"Требуется ремонт"

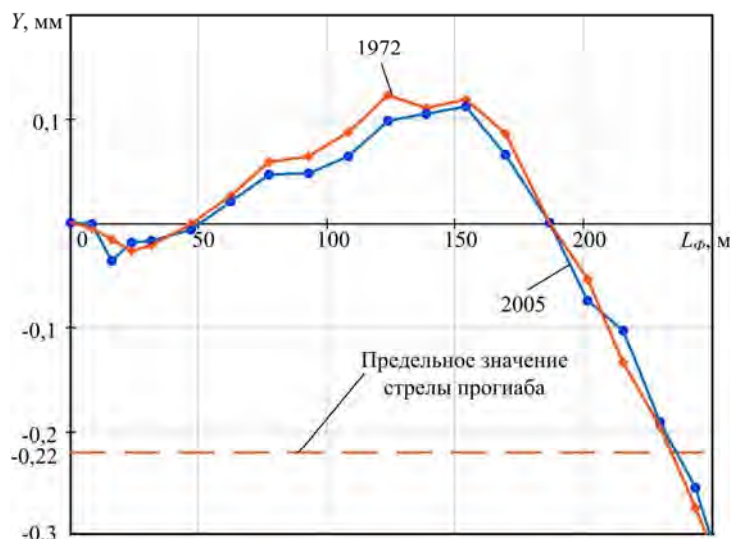


Рисунок 3 – Прогиб вдоль фермы, имевший место в 1972 и 2005 г.г.

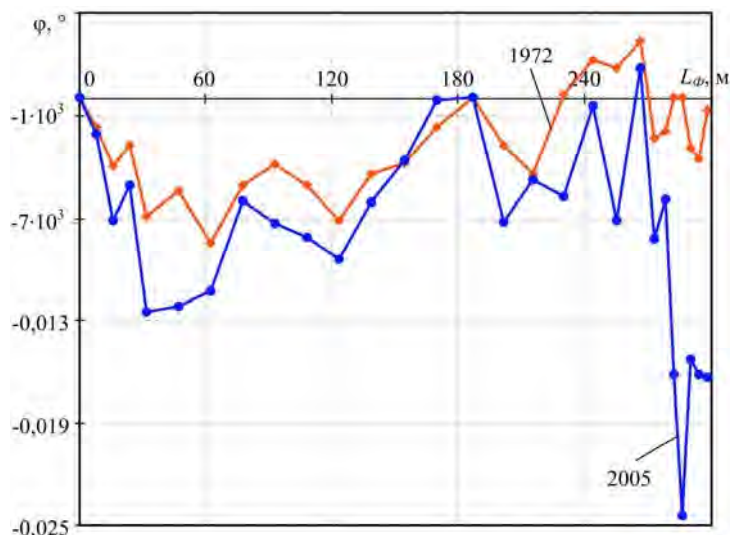


Рисунок 4 – Угол закручивания по длине фермы, имевший место в 1972 и 2005 г.г.

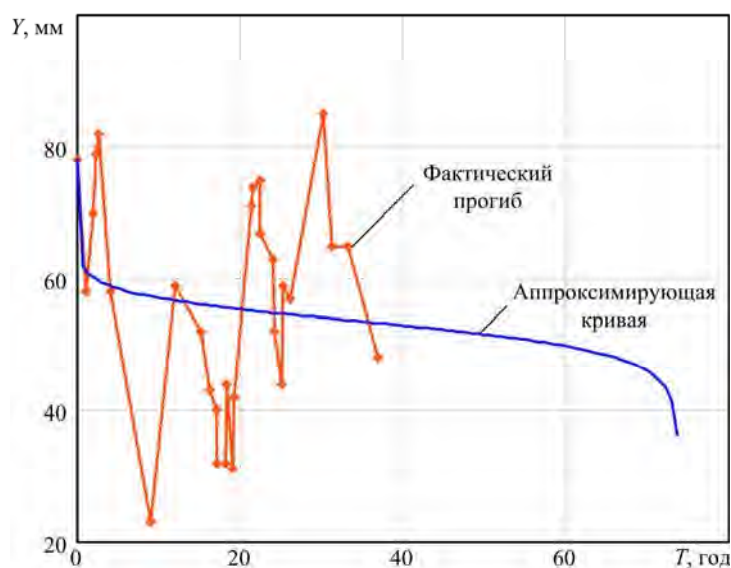


Рисунок 5 – Пример аппроксимации данных о фактическом прогибе в узле №8, находящемся в удовлетворительном состоянии

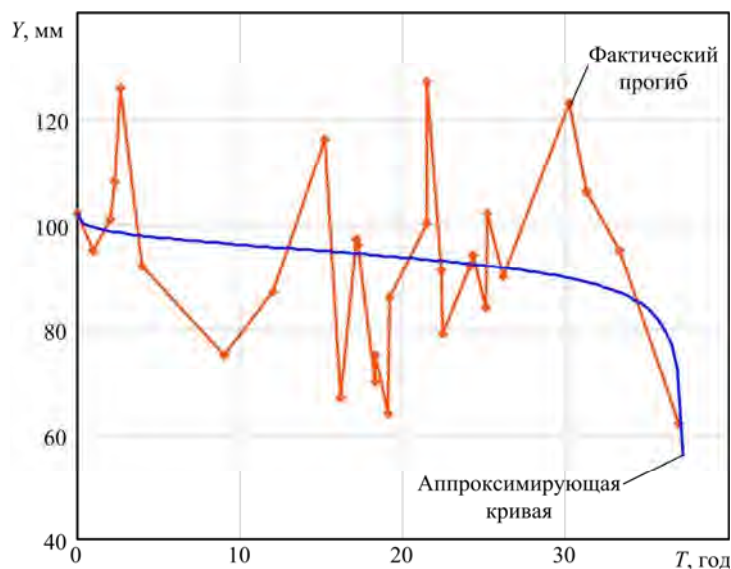


Рисунок 6 – Пример аппроксимации данных о фактическом прогибе в узле №9, требующего дополнительного контроля

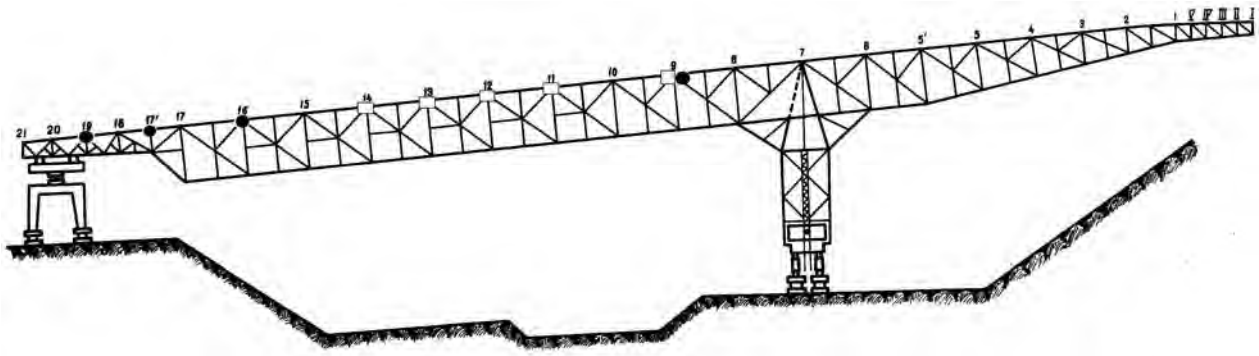


Рисунок 7 – Узлы фермы, подлежащие дополнительному обследованию с целью увеличения сопротивления поперечного сечения вертикальному прогибу:
 ● – с правой стороны фермы; □ – с левой стороны фермы

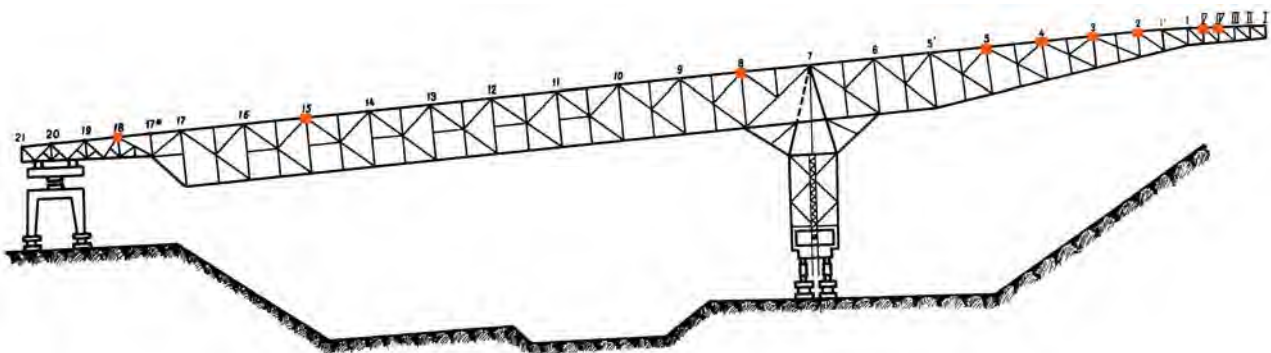


Рисунок 7 – Узлы фермы, подлежащие дополнительному обследованию с целью увеличения сопротивления поперечного сечения ферм скручиванию

ПРОТОКОЛ
контроля состояния моста в точке 10
 (при сроке его эксплуатации - 35,94 лет)
 – состояние моста – удовлетворительное;
 – степень поврежденности моста – $Q=0,3935$;
 – скорость изменения технического состояния – умеренная;
 – наработка моста до недопустимой степени износа составляет: 22,4...36,9 года.

ПРОТОКОЛ
контроля состояния моста в точке 11
 (при сроке его эксплуатации – 35,94 лет)
 – состояние моста – требуется дополнительное обследование;
 – степень поврежденности моста – $Q=0,5215$;
 – скорость изменения технического состояния – быстрая;
 – наработка моста до недопустимой степени износа составляет: 6,3...13,2 года.

Рисунок 9 – Примеры Протокола, составляемого по результатам экспресс оценки технического состояния транспортно-отвального моста

рисунках 8 и 9 указаны узлы моста, требующие дополнительного обследования.

Выводы

Анализ технического состояния моста показывает, что прогибы двухопорной фермы моста формально не достигли предельно допустимой величины (фактическая стрела прогиба меньше $0,0022 \cdot L_{\phi}$, где L_{ϕ} – длина фермы, м), а вот про-

гибы консольной части, начиная с узла №5 на левой стороне и №3 на правой стороне превысили предельное значение (стрела прогиба больше величины $0,0035 \cdot L_{\phi}$). Тем не менее, темп изменения прогиба незначительный, что дает удовлетворительный прогноз о наработке ферм до выхода из строя.

Однако отдельные узлы из-за повышенного темпа изменения прогиба фактически находятся

в критическом состоянии (рисунки 6 и 7). Фермы в районе этих узлов подлежат тщательному обследованию с целью выявления сквозной коррозии, разрывов, трещин и следов потери устойчивости (гармошек) силовых элементов ферм.

Обращает на себя внимание повышенная закрутка консольной фермы, особенно в районе узлов №5 и №I. По результатам обследования следует провести усиление ферменных конструкций, установкой дополнительных накладок и диагональных распорок в прямоугольное поперечное сечение ферм. Накладки будут препятствовать дальнейшему развитию возможных трещин в силовых элементах (стержнях) ферм, а распорки – дальнейшему повороту наиболее нагруженных сечений.

В дальнейшем необходимо регулярно проводить маркшейдерский контроль прогибов и углов закрутки ферм, дополняя тем самым имеющуюся базу данных и проводя её анализ по методике, использованной в настоящей работе, а в случае выявления узлов имеющих критические значения проводить экспертную оценку состояния транспортно-отвального моста.

Рассмотренный метод экспресс оценки реализован в виде программного комплекса, который позволяет анализировать динамику изменения с течением времени контролируемого параметра, прогнозировать на основе этого остаточный ресурс разнообразного промышленного оборудования и давать оценку его текущему техническому состоянию.

1. *Маркшейдерські роботи на вугільних шахтах та розрізах: Інструкція / Редкоміс.: М.Є. Капланець (голова) та ін. – Вид. офіц. – Донецьк: ТОВ "АЛАН", 2001. – 264 с.*
2. *Методика проведення експертного обсте-*

ження (технічного діагностування) кранів мостового типу ОМД 00120253.001-2005. – Харків: Підйомно-транспортна академія наук України, 2005. – 157 с.

3. *Методические указания по определению деформаций сооружений фотограмметрическим методом. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 42 с.*
4. *Крюков И.И., Оберемок Л.В., Патенко Д.Е. Определение величин деформаций металлоконструкций горных машин фотограмметрическим методом / Маркшейдерское дело. – Л., 1974. – Вып. 1. – С. 134.*
5. *Николаева Т.Г., Шоломицкий А.А., Фролов И.С., Сарвас Н.М. Наблюдения за деформациями металлоконструкций транспортно-отвального моста на Морозовском разрезе ОАО "Александрияуголь" / Научный вестник национального горничого университета. – 2008. – №9. – С. 55-59.*
6. *Николаева Т.Г., Шоломицкий А.А. Сравнительный анализ методов наблюдения за деформациями металлоконструкций транспортно-отвального моста / Научный вестник национального горничого университета. – 2008. – №11. – С. 45-50.*
7. *Красножон Г.Н., Нагорный В.М. Прогнозирование ресурса металлоконструкций на основе аналитических зависимостей, отражающих физику разрушения металла / Подъемные сооружения и специальная техника. – 2007. – №10. – С. 36-37.*
8. *Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Ревуцкий В.Н., Пригаров В.А. Измерительный комплекс "Визир 3D" на предприятиях Украины: Геодезический контроль и выверка технологического оборудования / Геопрофиль. – №3(6). – 2009. – С.12-19.*

Статья поступила 10.08.2009 г.

*© А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, В.М. Нагорный, В.В. Нагорный, Т.Г. Николаева, Н.В. Малеев, 2009
Рецензент д.т.н., проф. В.Я. Седуш*