

части дамбы. То есть на каждом шаге интегрирования программа предусматривала анализ получаемых результатов в каждом конечном элементе на предмет выявления максимального (по модулю) значения того или иного напряжения, которые затем и были представлены в виде изобар.

Сравнение полей напряжений, возникающих в теле дамбы при нестационарном воздействии, приводит к следующим выводам.

Здесь, как и ранее, крутизна или, напротив, пологость откоса оказывает влияние на возникающее в теле дамбы напряженно-деформированное состояние. На верховом откосе появляются растягивающие напряжения, причем их величина на крутом откосе вдвое превосходит главные напряжения в пологом откосе. С увеличением крутизны значительно возрастают и касательные и максимальные касательные напряжения.

Таким образом, воздействие сейсмических нагрузок приводит к появлению дополнительных динамических нагрузок в теле защитной дамбы, что необходимо учитывать при их проектировании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ержанов Ж.С., Баймухаметов М.А., Куангалиев М.А. Исследование напряженно-деформированного состояния защитной дамбы при динамических воздействиях // Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 10-летию независимости Республики Казахстан «Современные проблемы образования и науки в начале века». – Караганда, 2001. – С. 86-90.
2. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1985. – 392 с.
3. Уилкинсон Дж. Х. Алгебраическая проблема собственных значений. – М.: Наука, 1970. – 504 с.

УДК 622.673.6.001.4:620.178.3

В.И. Бережинский

### **О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ КАНАТОВ**

На основі експериментальних даних сформульовано принципи побудови можливих статистичних моделей для опису процесу накопичування стомленостних обривів проволочок в сталевих канатах.

#### **ABOUT MODELING PROCESS WEARINESSING DESTRUCTION OF STEEL WIRE ROPES**

On the basis of experimental data the principles of construction of possible statistical models for the description of process of accumulation wearinessing of breakages of wire in steel ropes are formulated.

При експлуатації сталевих проволочних канатів на підйомно-транспортних установках в отличие від звичайних деталей машин, працюючих під дією змінних навантажень, заведомо передбачається продовження використання канатів, у яких відбувається усталостне руйнування, виражається в появі обривів проволочок. Більше того, саме можливість стежити за ступенем усталостного руйнування канатів було одним з їхніх переваг по відношенню до гачків, які в XIX столітті стали використовувати вме-

сто веревок для повышения грузоподъемности установок, но которые неожиданно рвались из-за усталостного разрушения какого-либо звена.

В настоящее время появилась возможность с использованием канатных дефектоскопов выявлять с той или иной надежностью обрывы проволок, не только видимые при визуальном осмотре каната, но и расположенные внутри каната. Вместе с тем нормы браковки канатов по обрывам проволок, несмотря на большие достижения в области создания канатных дефектоскопов и повышения качества изготовления остаются неизменными более 100 лет, что приводит к недоиспользованию ресурса большинства канатов.

Одна из основных причин такого положения дел заключается в том, что усталостное разрушение каната существенным образом зависит от элемента случайности, что известно и потребителям канатов по наблюдаемому разбросу сроков службы, и исследователям.

Наглядной иллюстрацией значимости элемента случайности при усталостном разрушении канатов являются результаты разрушения образцов канатов при параллельных испытаниях образцов, взятых из одного каната, на гидропульсационной машине в одном и том же режиме. В МакНИИ такие испытания принято проводить при частоте циклов 400 в минуту, максимальной нагрузке цикла, равной

$$F_{\max} = 1,33 * 5,4^{-1} F_{C_0} \quad (1)$$

где  $F_{C_0}$  - суммарное разрывное усилие всех проволок в канате, и минимальной нагрузке цикла, равной половине максимальной [1].

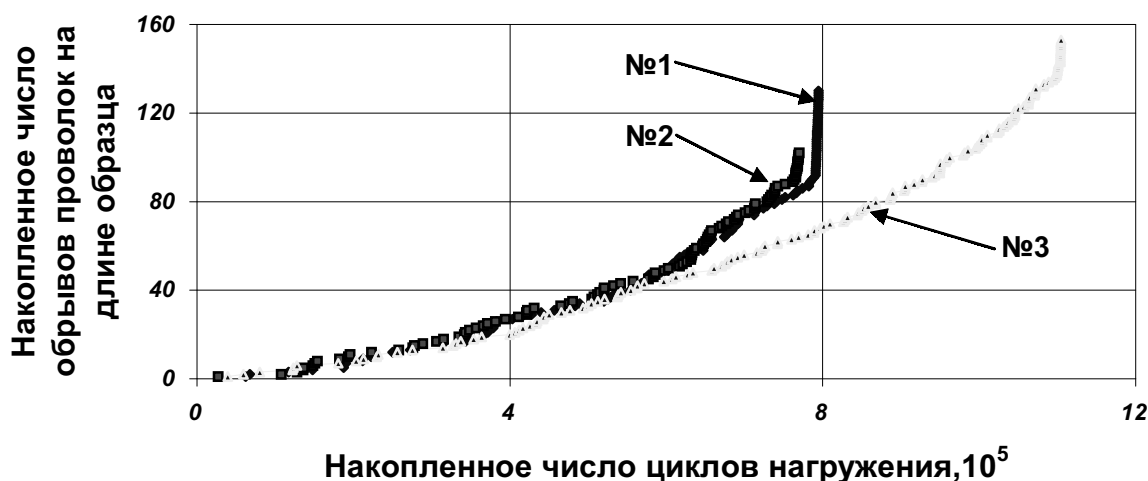


Рис. 1 – Результаты испытаний, полученные на образцах каната диаметром 27,5 мм конструкции 6х19(1+6+12)+1о.с., изготовленного из пластически обжатых прядей, с длиной рабочей части ~950 мм (без интервала до 1-го обрыва). Момент появления очередного обрыва фиксировался по звуковому щелчку.

Как видно, графики для первого и второго образца близки между собой.

Первая половина графика для образца №3 также совпадает с графиками для двух остальных образцов, но дальше накопление обрывов проволок идет для данного образца значительно медленнее. Для всех образцов постепенное накопление усталостных обрывов переходит в какой-то момент в лавинообразный процесс, причем во всех случаях этот переход происходит после обрыва одной пряди.

Обрывы проволок, происходящие время от времени, представляют ряд событий с нерегулярными интервалами, имеющими некоторую функцию распределения, причем нас интересуют именно интервалы между событиями, а не сами события, но именно для изучения таких типов поведения разработана теория случайных точечных процессов [2]. Чтобы воспользоваться ею, также как и другими возможными математическими моделями, пригодными для описания неубывающей ступенчатой функции с единичными скачками, необходимо рассматриваемую задачу проанализировать с инженерной точки зрения.

Проволоки реального стального каната по его длине и поперечному сечению нагружены с некоторым разбросом относительно среднего расчетного уровня, что вызывается различного рода случайными колебаниями размеров сердечника и диаметра самих проволок. Кроме того, по длине каждой проволоки случайным образом расположены "слабые места". Поэтому повреждения в отдельных проволоках, приводящие к их обрывам, накапливаются под действием перемнной растягивающей нагрузки в произвольных по длине каната местах.

Если бы силы трения между проволоками отсутствовали, то обрыв каждой проволоки приводил бы к соответствующему увеличению нагрузки на все остальные проволоки по всей длине каната. С ростом числа обрывов перегрузки всех оставшихся целыми проволок по всей длине непрерывно бы возрастали, ускоряя их разрушение. Но на самом деле силы трения между проволоками реализуются весьма ощутимо, и оборванная проволока включается в работу достаточно близко от места обрыва, т.е. перегрузки соседних с оборванной проволокой локализуется на малой длине каната и все проволоки каната по его длине продолжают работать в тех же условиях, какие были до этого.

Пусть  $N_i$  есть число циклов нагружения до появления  $i$ -го обрыва проволоки (видимого при визуальном осмотре либо невидимого, зафиксированного каким-либо методом - например, по звуку при лабораторных испытаниях на выносливость), а  $\{n_i\}$  - последовательность интервалов в циклах нагружения между  $(i+1)$  и  $i$ -тым обрывами. Тогда о последовательности  $\{N_i\}$ , имеющей место до того, как обрывы проволок начнут концентрироваться на каком-либо небольшом по длине участке каната, можно говорить как о совокупности независимых случайных величин - циклических долговечностей отдельных проволок. Число их во много раз больше количества проволок, из которых свит канат, и испытываются они вне каната в условиях нагружения, адекватных работе проволоки в канате. Отличие заключается лишь в том, что при испытаниях отдельных проволок  $\{N_i\}$  не представляла бы собой вариационного ряда. Но последнее означает, что  $N_i$  есть независимые и одинаково распределенные величины и можно предполагать существование первой фазы усталостного разрушения каната, для

аналитического описания которой можно воспользоваться теорией процессов восстановления.

Задача выделения первой фазы всего процесса в некотором смысле совпадает с рассмотренной А.Н. Ширяевым задачей оптимальной остановки в случайной последовательности событий, характеризующейся тем, что так называемый "момент разладки" разделяет всю последовательность на две части, для каждой из которых существует своя функция распределения [3].

Существуют физические предпосылки и для иных вариантов моделей процесса усталостного разрушения стального каната. Так, все обрывы проволок можно разделить на два типа: основные, разделенные случайными интервалами  $z_1, z_2, \dots$  и характеризующиеся тем, что они произошли при нагружении проволок на заданном расчетном уровне напряжений, и дополнительные, характеризующиеся тем, что причина их появления заключается в повышении уровня напряжений вследствие основных обрывов. При этом каждый основной обрыв может вызывать появление  $V$  дополнительных обрывов, разделенных случайными интервалами  $Y_1, Y_2, \dots, Y_V$ . Число  $V$  может быть равно нулю, т.е. основной обрыв может не вызвать ни одного дополнительного. Полный процесс образуется обрывами проволок двух типов, которые по внешнему виду, различить нельзя.

Описанный процесс относится к ветвящимся процессам восстановления и в качестве модели для последовательности событий, как отмечается в работе [2]. Применительно к рассматриваемой нами задаче смысл использования данной модели заключается в том, что нам известна дополнительная информация о характере протекания процесса. Согласно предпосылкам, позволившим сформулировать первую модель процесса усталостного разрушения стального каната, известно, что дополнительные обрывы проволок не являются в равной мере случайными на протяжении всего процесса. Они начинают существенно влиять на ход процесса в целом при появлении участков с концентрированным расположением обрывов, которое в определенной мере и является признаком наличия дополнительных обрывов. Отсюда следует, что, оценив математическое ожидание  $M(z)$  длины интервала между обрывами проволок основного процесса по параметрам процесса в целом, можно найти момент (номер обрыва), после которого на интенсивность нарастания обрывов начинает влиять повышение уровня нагрузки на проволоки вследствие ее перераспределения за счет ранее появившихся обрывов.

Физические предпосылки взаимосвязи между уровнем нагрузки на проволоки и наработкой их до разрушения позволяют привлекать и другие алгоритмы. Один из них заключается в следующем.

Пусть  $\alpha_i(t)$ ,  $i = \overline{1, r}$  –  $r$  независимых между собой процесса Пуассона с параметрами  $\lambda_1, \dots, \lambda_r$  соответственно,  $\beta(t)$  – независимая от процессов  $\alpha_i(t)$  неоднородная цепь Маркова с непрерывным временем, пространством состояний  $\{1, 2, \dots, r\}$  и матрицей интенсивностей переходов в момент времени  $t$

$$Q(t) = \left\| q_{ij}(t) \right\|_{ij=1, \overline{r}} \quad (2)$$

По процессам  $\alpha_i(t)$  и  $\beta(t)$  образуем новый процесс  $\gamma(t)$  следующим образом. Пусть  $\beta(0) = i$ . Тогда в течение времени пребывания  $\beta(t)$  в состоянии  $i$  процесс  $\gamma(t)$  совпадает с  $\alpha_i(t)$ . В момент перехода цепи  $\beta(t)$  из состояния  $i$  в состояние  $j \neq i$   $\gamma(t)$  "перескакивает" на траекторию процесса  $\alpha_j(t)$  и совпадает с ним в течение времени пребывания  $\beta(t)$  в состоянии  $j$  и т.д.

Процессы  $\alpha_i(t)$  в данной модели описывают образование обрывов проволок на исходном уровне напряжений, а  $\beta(t)$  отражают случайный характер влияния повышенного уровня напряжений вследствие наличия обрывов в соседних проволоках. Процесс  $\{\gamma(t), \beta(t)\}$  является марковским [4]. Первая координата его принимает значения  $0, 1, 2, \dots$  и траектория ее является ступенчатой, неубывающей, с единичными скачками. Для вероятности  $P_{ij} = P\{\gamma(t) = i; \beta(t) = j\}$  можно вывести систему уравнений Колмогорова.

Вычисления, проведенные по алгоритмам первой модели для канатов разных конструкций, показывают, что разные статистические критерии позволяют достаточно надежно выделять первую стадию процесса, для которой интервалы между обрывами независимы или имеют пуассоновское распределение. При этом количество обрывов проволок на длине одного шага свивки в 1,2-2 раза превышают допустимое по ныне действующим правилам безопасности.

Однако на практике необходимо принимать решение о завершении первой стадии процесса, не имея полной последовательности и непрерывных результатов наблюдений (дефектоскопия канатов производится периодически). Данные факторы оказывается возможным преодолеть за счет введения распределения накопленных между последовательными проверками канатов обрывов проволок внутри интервала и использования критериев, наименее чувствительных к объему обрабатываемых данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый В.Д., Лесин К.К., Самарский А.Ф. Выбор, навеска, эксплуатация и контроль шахтных канатов. – М.: Недра, 1967. – 228 С.
2. Кокс Д., Льюис П. Статистический анализ последовательностей событий // Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. 312 С.
3. Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ: Оптимальные правила остановки. – М.: Наука, 1969. – 232 С.
4. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы - М.: Советское радио, 1977. 488 С.