



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ АНКЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Сообщение 1. Анализ напряженно-деформированного состояния и собственных частот анкера

Н. И. БУРАУ, Ю. В. КЛЕФА, Э. В. КУЛИШ (НТТУ «Киевский политехнический институт»)

Выполнено теоретическое обоснование и анализ модели стержня анкера. Разработана дискретная модель противооползневого анкерного сооружения, исследовано влияние изменения натяжения стержня анкера на параметры напряженно-деформированного состояния опорной стенки, определены собственные частоты колебаний элементов конструкции при некоторых видах закрепления стержня анкера.

Theoretical substantiation and analysis of anchor rod model were performed. A discrete model was developed of anti-landslide anchor construction, influence of the change of anchor rod tension on the parameters of the stressed-strained state of retaining wall was studied, and inherent frequencies of structural element oscillations for some types of anchor rod fastening were determined.

Одним из видов защиты территорий и расположенных на них сооружений от распространения и катастрофических последствий оползневых процессов, происходящих в районах со сложными эколого-геологическими условиями и повышенной сейсмической активностью, являются противооползневые анкерные сооружения. Они устанавливаются в потенциально опасных местах с подпорными стенками. Основным фактором, определяющим плотность установки анкеров, принимается их начальное натяжение, которое полагается неизменным на протяжении всего периода эксплуатации сооружения. Однако под влиянием оползневых процессов натяжение анкеров со временем может изменяться. В некоторых случаях это может привести к тому, что анкер будет вырван из коренной породы и не будет выполнять поддерживающую функцию без каких-либо видимых внешних признаков изменения его технического функционального состояния. Поэтому для противооползневых сооружений необходимо периодически проводить контроль натяжения анкеров, что является важной информацией для оценки их текущего состояния, состояния оползневых процессов и прогнозирования их дальнейшего развития.

Анкерное противооползневое сооружение является (рис. 1) сложным инженерным сооружением, состоящим из подпорной плиты 1, натяжного устройства 2, стержня 3 и замкового устройства 4. Замковое устройство служит для закрепления анкера в горной породе, натяжное — для создания в стержне анкера напряжений для уменьшения или устранения деформации и смещения «сшиваемых» горных пород. В качестве стержня

на практике чаще всего используются сталеполимерные конструкции, арматурный металлопрокат, сталеорганические конструкции, канатно-тросовые конструкции [1, 2]. Последние представляют собой распорные анкеры глубокого залегания длиной до 30 м, состоящие из четырех стержней из металлопроката, которые внедряются в пробуренный до коренной породы шурф.

Проводимые теоретические исследования горных анкеров в основном касаются вопросов прочности и надежности их креплений (замковых устройств) для различных этапов эксплуатации. В работе [1] предложены и исследованы разнообразные конструктивные решения элементов анкерного крепления, а также исследованы нагрузки, действующие на стержень анкера на всех этапах его работы. Для математического описания анкер представлялся моделью пространственно-криволинейного стержня, который находится под действием статических и динамических нагрузок. Полученные результаты позволяют выработать требования к геометрическим размерам и характеристикам используемых материалов всех эле-

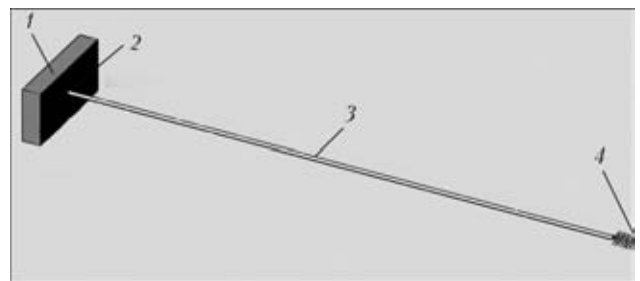


Рис. 1. Схема конструкции анкерного противооползневого сооружения: 1 — подпорная плита; 2 — натяжное устройство; 3 — стержень; 4 — замковое устройство

ментов анкерного крепления, но не являются достаточными для контроля возможных деформаций и смещений горных пород в месте закрепления анкера под воздействием естественных возмущений земли.

Целью данной работы является установление характера и функциональных зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния противооползневых сооружений и собственных частот стержня анкера от изменения его натяжения, на основании чего может быть разработан новый метод диагностики функционального технического состояния противооползневых анкерных устройств.

Теоретическое обоснование и анализ модели противооползневого анкера. В работах [2, 3] для математического описания закрепленного и натянутого анкера использовали модель упругого тела с распределенными параметрами — модель закрепленной и натянутой струны с первоначальным значением осевой растягивающей силы P . В первом приближении не учитывается ограничение прогиба струны стенками шурфа. Появление прогиба (отклонение струны в поперечной плоскости) характеризует поперечные колебания модели.

Как известно [4], поперечные вибрации струны под влиянием осевой растягивающей силы P описываются выражением:

$$y = \sin \frac{n\pi}{l} x \left(A_n \cos \frac{\alpha n \pi}{l} t + B_n \sin \frac{\alpha n \pi}{l} t \right), \quad (1)$$

где $a = \sqrt{Pg/Q}$; g — ускорение силы тяжести; Q — вес струны; l — длина струны; A_n, B_n — коэффициенты, определяющие амплитуды колебаний струны по первой ($n = 1$) и высшим ($n = 2; 3; \dots$) формам колебаний; x, y — соответственно осевое и поперечное перемещение.

Частоты f_{no} в общем случае для n -й формы колебаний (1) определяются как

$$f_{no} = \frac{an}{2l} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{Pg}{lQ}}. \quad (2)$$

Пусть при деформации и смещении места закрепления анкера осевая сила P меняется:

$$P_1 = P \pm \Delta P,$$

где ΔP — изменение величины растягивающей силы; знак «+» соответствует увеличению натяжения в стержне анкера под действием оползня; «-» — уменьшению натяжения и случаю, когда анкер вырван из коренной породы.

Обозначив относительное изменение растягивающей силы $z = \Delta P/P$, последнее выражение принимает вид $P_1 = P(1 \pm z)$. В этом случае собственные частоты колебаний (2) будут функцией коэффициента z :

$$f_{n1} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{P_1 g}{lQ}} = f_{no} \sqrt{1 \pm z}. \quad (3)$$

Показатель изменения собственных частот R колебаний стержня при изменении величины осевой растягивающей силы P определяется из (2) и (3) выражением:

$$R = \frac{f_{n1}}{f_{no}} = \sqrt{1 \pm z}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов показателя изменения собственных частот R в зависимости от значения относительного изменения растягивающей силы z при увеличении ($R_{(+)}$) и уменьшении ($R_{(-)}$) растягивающей силы.

Как видно из приведенных результатов, малые изменения растягивающей силы ($z \leq 0,1$) приводят к изменению собственных частот не более, чем на 5 % при любом знаке изменения показателя R . Изменение осевой растягивающей силы в диапазоне $0 < z \leq 0,3$ приводит к изменению собственных частот по всем формам колебаний примерно на 14...16 %, а в диапазоне изменения параметра z до 0,5 — к изменению частот до 30 %.

Как следует из приведенных результатов, изменение собственных частот стержня анкерного противооползневого сооружения может быть использовано для контроля его натяжения и, соответственно, диагностики состояния анкерного противооползневого сооружения и возможности его осуществлять поддерживающие функции.

Разработка и анализ дискретной модели противооползневого анкера. При разработке метода диагностики состояния анкерных сооружений необходимо учитывать ряд факторов, связанных с конструкцией анкерного сооружения, технологией его установки и контролепригодностью, накладывающих значительные ограничения на возможность и эффективность проведения контроля [1, 5]. Одним из таких факторов является недоступность стержня анкера для измерения его натяжения или собственных частот. Анкерные противооползневые сооружения устанавливаются таким образом, что для проведения измерений доступной остается только подпорная стенка. Поэтому одной из важных задач при разработке метода диагностики противооползневых анкерных сооружений является определение влияния изменения натяжения стержня анкера на величины напряжений, перемещений и деформации подпорной стенки.

Для этой цели с использованием метода конечных элементов разработали дискретную модель противооползневого анкерного сооружения. Стержень анкера моделировался стальным тросом из углеродистой стали со следующими характеристиками: плотность 7850 кг/м³; модуль упру-

Таблица 1. Зависимости показателя R от коэффициента z

z	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
$R_{(+)}$	1,005	1,025	1,049	1,072	1,095	1,140	1,183	1,225
$R_{(-)}$	0,995	0,975	0,949	0,922	0,894	0,837	0,774	0,707



гости $2,05 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $0,29$; модуль сдвига 8 Н/м^2 ; предел прочности при растяжении $5,85 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$. Подпорная стенка в модели представлена бетонной плитой со следующими характеристиками: плотность 2000 кг/м^3 ; модуль упругости $2,75 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $0,2$. Сетка модели содержит 8444 элемента и 14572 узла.

Для исследования зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния подпорной стенки от параметров, характеризующих состояние анкерного сооружения, в процессе моделирования изменялась (уменьшалась) величина жесткости стержня анкера. Уменьшение жесткости проводилось за счет уменьшения диаметра стержня (утончение стержня).

Пусть исследуемый объект описывается моделью линейной колебательной системы, состоящей из инерционного (масса m) и упругого (жесткость C) элементов, тогда собственная частота такой системы определяется выражением $\omega_* = \sqrt{C/m}$. При уменьшении жесткости на величину Δ собственную частоту ω_Δ можем определить в виде:

$$\omega_\Delta = \sqrt{\frac{C-\Delta}{m}} = \omega_* \sqrt{1 - \frac{\Delta}{C}}$$

В полученном выражении отношение $\Delta C = \Delta/C$ будем рассматривать как относительное изменение жесткости, тогда отношение собственных частот ω_Δ и ω_* будет функцией относительного изменения жесткости:

$$\frac{\omega_\Delta}{\omega_*} = \sqrt{1 - \Delta C} \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), увеличение относительного изменения жесткости ΔC приводит к уменьшению собственной частоты ω_Δ по сравнению с первоначальным значением ω_* . Результаты расчетов функциональной зависимости отношения частот (5) от параметра ΔC приведено в табл. 2.

Учитывая характер влияния уменьшения жесткости исследуемого объекта на его собственную частоту, а также с учетом приведенных в табл. 1 результатов, можно в первом приближении сопоставить влияние на собственные частоты изменения жесткости стержня анкера и уменьшения его натяга. Это позволит несколько упростить процедуру моделирования противооползневое анкерного устройства.

С учетом изложенного выше, относительное изменение жесткости ΔC принималось равным

Таблица 2. Зависимость отношения собственных частот от параметра ΔC

ΔC	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
ω_Δ/ω_*	0,95	0,92	0,89	0,87	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71

$0,15$, что соответствует значению показателя изменения собственных частот $R_{(-)} = 0,92; 0,25$ ($R_{(-)} = 0,87$); $0,5$ ($R_{(-)} = 0,7$). Таким образом, моделирование стержня с дискретно изменяющейся для каждого модельного эксперимента жесткостью косвенно (по влиянию на собственные частоты) соответствует моделированию стержня анкера в виде струны с изменяющимся натяжением. В этом случае параметр ΔC может рассматриваться как параметр, характеризующий состояние анкерного сооружения, причем величина относительного изменения жесткости $\Delta C = 0$ характеризует изначальное состояние анкера после его установления и требуемого натяжения. Увеличение ΔC характеризует уменьшение $R_{(-)}$, что, в соответствии с приведенными в табл. 1 результатами, свидетельствует об уменьшении растягивающей силы.

Анализ влияния изменения состояния анкера на параметры напряженно-деформированного состояния подпорной стенки. В процессе моделирования противооползневое анкерное сооружение были установлены зависимости величины перемещений D , напряжений V и деформации S подпорной стенки от значения относительного изменения жесткости ΔC стержня анкера.

На рис. 2 представлен пример моделирования и определения перемещений подпорной стенки для случая $\Delta C = 0$. Как видно из представленного рисунка, максимальное перемещение имеет плита, а стержень анкера имеет минимальное перемещение в области его закрепления в корневой породе (замковом устройстве). Значения максимального и минимального перемещений изменяются с изменением жесткости стержня, а именно, значения перемещений увеличиваются с уменьшением жесткости.

Изменение минимального значения перемещения D_{\min} при моделировании и исследовании дискретной диагностической модели противооползневое анкерное сооружение может быть интерпретировано как перемещение корневой породы и активизации оползневых процессов. Относительное изменение жесткости стержня ΔC и соответствующее изменение собственных частот $R_{(-)}$

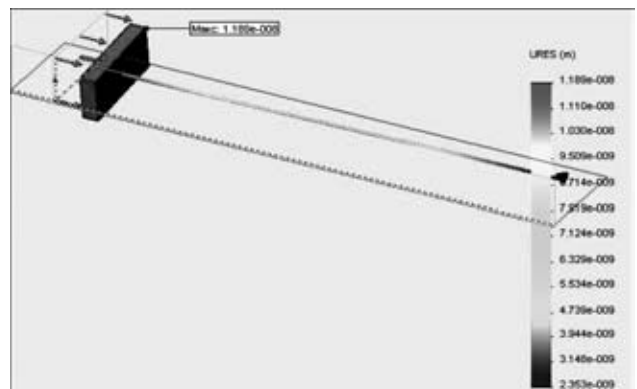


Рис. 2. Пример моделирования и определения перемещений подпорной стенки

будем рассматривать как параметры, которые характеризуют функциональное состояние анкера и его способность выполнять поддерживающую функцию.

Изменение максимального перемещения D_{\max} при исследовании будем рассматривать как признак изменения натяжения анкера и его собственных частот. Соотношение значений минимального и максимального перемещений также зависит от изменения жесткости стержня анкера. Величина D_{\max} превышает D_{\min} в пять раз для случая $\Delta C = 0$, с увеличением ΔC разница между ними уменьшается, а при $\Delta C = 0,5$ значения максимального и минимального перемещений практически совпадают. В последнем случае это свидетельствует о том, что анкер вырван из коренной породы, а противооползневое анкерное устройство не выполняет своей поддерживающей функции.

В табл. 3 приведены зависимости относительных значений максимального ΔD_{\max} и минимального ΔD_{\min} перемещений от относительного изменения (уменьшения) жесткости ΔC , которые по результатам моделирования были рассчитаны по выражениям:

$$\Delta D_{\max} = \frac{D_{\max}(\Delta C)}{D_{\max}(0)}, \quad \Delta D_{\min} = \frac{D_{\min}(\Delta C)}{D_{\min}(0)}, \quad (6)$$

где $D_{\max}(\Delta C)$ и $D_{\min}(\Delta C)$ — соответствующие перемещения при изменении жесткости стержня анкера ($\Delta C \neq 0$); $D_{\max}(0)$ и $D_{\min}(0)$ — перемещения при начальном значении жесткости стержня ($\Delta C = 0$).

Как видно из полученных результатов, значения минимальных перемещений существенно (более, чем на два порядка) увеличиваются с уменьшением жесткости стержня анкера. Однако эти перемещения недоступны измерению, так как они происходят в месте закрепления анкера в коренной породе.

Значение максимальных перемещений увеличивается незначительно (на 4%) в диапазоне значений относительного уменьшения жесткости стержня $\Delta C \leq 0,15$, что соответствует $R_{(-)} \leq 0,97$ и $z \leq 0,005$. Дальнейшее уменьшение жесткости стержня приводит к более значительному увеличению максимальных перемещений.

При определении напряжений V было установлено, что максимальные напряжения испытывает стержень анкера, а минимальные — плита (подпорная стенка). С изменением жесткости стержня величины напряжений практически не изменяют-

ся (изменения в пределах 0,4 %). При этом минимальные напряжения V_{\min} однозначно уменьшаются в указанном диапазоне с уменьшением жесткости, а для V_{\max} нет однозначной зависимости от изменения жесткости стержня.

При определении деформации S , как и в предыдущем случае, максимальные значения деформации имеет на стержне анкера, а минимальные — на плите. В результате моделирования установлено, что максимальные значения деформации S_{\max} практически не зависят от жесткости стержня анкера, а минимальные значения S_{\min} незначительно увеличиваются с уменьшением жесткости стержня (около 3 % для $\Delta C = 0,5$).

Таким образом, исследования дискретной модели противооползневого анкерного сооружения показали, что наиболее чувствительным к изменению жесткости стержня анкера является перемещение его элементов конструкций. Изменение перемещения, измеренного на плите противооползневого сооружения, может служить диагностическим признаком изменения натяжения анкера.

Анализ собственных частот дискретной модели противооползневого анкерного сооружения. Для определения собственных частот элементов конструкции противооползневого сооружения моделирование проводилось с учетом следующих условий: стержень анкера жестко закреплен в подпорной стенке; замковое устройство стержня жестко закреплено в коренной породе; не учитывается влияние стенок шпура (скважины); подпорная стенка не закреплена на грунте; анализируются три первые формы колебаний; относительное изменение жесткости ΔC принималось равным 0 и 0,15. Примеры колебаний приведены на рис. 3.

Как видно из представленных результатов, наибольшие напряжения наблюдаются в замковом устройстве и в узлах колебаний. В результате моделирования определены и проанализированы собственные частоты колебаний по первым трем формам для указанных выше значений ΔC . Уменьшение жесткости стержня ($\Delta C = 0,15$) в данном случае является уменьшением жесткости всей конструкции «стержень–подпорная стенка» и приводит к уменьшению собственных частот колебаний в 3 раза по первой форме, на 72 % по второй и в 2 раза по третьей форме колебаний.

Кроме того, проведено моделирование и определены собственные частоты для описанных выше условий в случае жесткого закрепления подпорной стенки на грунте. Примеры колебаний приведены на рис. 4. В этом случае наблюдаются колебания только стержня анкера, как и при представлении стержня моделью натянутой и закрепленной струны.

Таблица 3. Зависимости ΔD_{\max} и ΔD_{\min} от относительного изменения жесткости стержня

ΔC	0	0,15	0,25	0,50
ΔD_{\max}	1	1,04	2,61	28,82
ΔD_{\min}	1	1,79	9,15	143,41

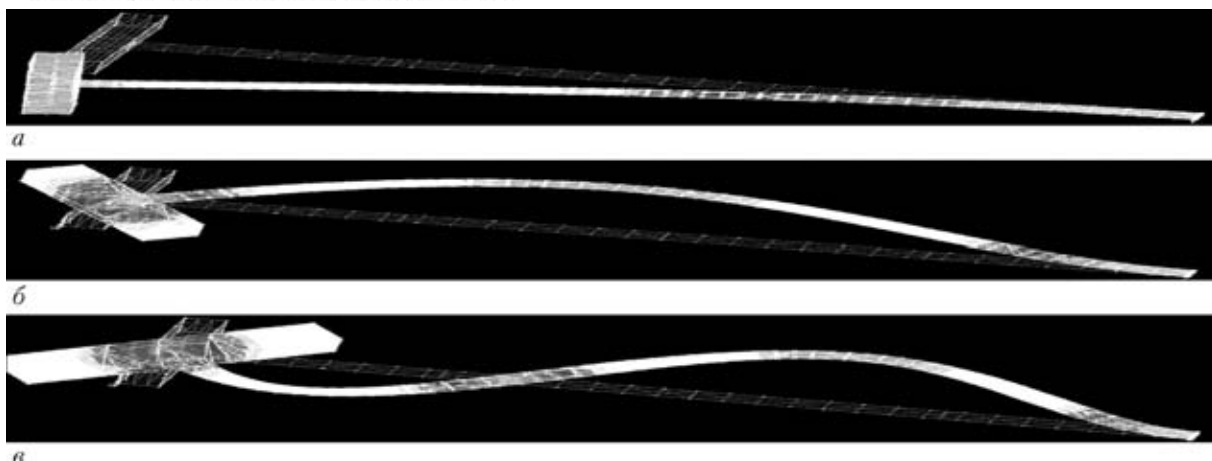


Рис. 3. Колебания анкера с закрепленным замковым устройством и свободной подпорной стенкой по первой (а), второй (б) и третьей (в) формам

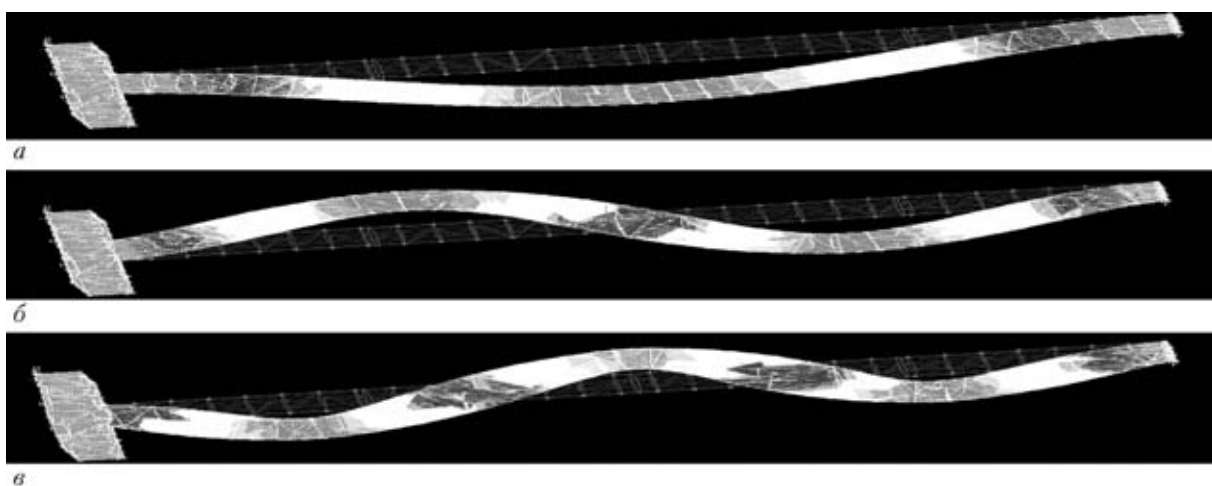


Рис. 4. Колебания стержня анкера с закрепленными замковым устройством и подпорной стенкой по первой (а), второй (б) и третьей (в) формам

Как видно, наибольшие напряжения анкерное сооружение испытывает в местах закрепления (в замковом устройстве, на подпорной стенке) и в узлах колебаний. Для случая $\Delta C = 0,15$ отношение собственных частот ω_{Δ}/ω_* по всем трем формам колебаний составило 0,77, что существенно отличается от результатов теоретических расчетов, представленных в табл. 2. Это связано с достаточно грубым приближением при моделировании стержня анкера линейной колебательной системой без учета подпорной стенки. Если сравнить значения относительных частот с результатами, приведенными в табл. 1, можно сделать вывод, что утончение стержня (изменение ΔC) на 0,15 приводит к таким же изменениям собственных частот анкера, как относительное изменение натяга более, чем на 0,4.

Таким образом, для каждого из рассмотренных способов закрепления элементов конструкции противооползневого анкерного сооружения наблюдается уменьшение собственных частот при уменьшении натяга стержня анкера, что может быть использовано в качестве диагностического

признака изменения функционального состояния исследуемого объекта.

Выводы

Рассмотрены аналитическая модель стержня анкера в виде натянутой струны, которая позволяет установить зависимость собственных частот стержня анкера от изменения его натяжения, и модель в виде линейной колебательной системы. Показано, что по влиянию на собственные частоты моделирование стержня с изменяющейся жесткостью соответствует моделированию стержня анкера в виде струны с изменяющимся натяжением. Предложено при исследованиях противооползневых анкерных сооружений рассматривать относительное изменение жесткости стержня анкера как параметр, характеризующий его состояние (косвенно — его натяжение).

С использованием метода конечных элементов разработана дискретная модель противооползневого анкерного сооружения и проведен анализ влияния изменения состояния анкера (изменение жесткости его стержня) на параметры напряженно-деформированного состояния подпорной стен-

ки. Установлено, что наиболее чувствительным к изменению жесткости стержня анкера является перемещение подпорной стенки. Изменение перемещения, измеренного на плите противоположного сооружения, можно использовать в качестве диагностического признака изменения натяжения анкера.

Проведено моделирование, определение и анализ собственных частот и форм колебаний элементов конструкции противоположного анкерного сооружения при некоторых видах закрепления стержня (с закрепленным замком и свободной подпорной стенкой, с закрепленным замком и закрепленной подпорной стенкой). Проанализировано влияние изменения жесткости стержня анкера на его собственные частоты. Показано, что уменьшение жесткости стержня приводит к уменьшению собственных частот по всем формам колебаний сооружения, но в гораздо большей степени, чем в теоретических расчетах. Это связано с тем, что дискретная модель противоположного сооружения в большей степени по сравнению с используемой теоретической моделью отражает его сложную структуру (стержень анкера, подпорная стенка, способы закрепления стержня) и влияние

изменения состояния на собственные частоты и формы колебаний.

Полученные результаты являются новыми и могут быть использованы при разработке метода вибрационной диагностики функционального технического состояния противоположных анкерных сооружений.

1. *Мошкин Н. В.* Исследование нагружений и деформаций горных анкеров как пространственно-криволинейных стержней и совершенствование их элементов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск: Томск. политехн. ун-т, 2004. — 22 с.
2. *Аврутова І. В.* Методологія вібраційної діагностики протизсувного анкеру для визначення зміни його натягу / І. В. Аврутова, Н. І. Бурау, Ю. Г. Жуковський // Будівельні конструкції. — 2007. — Вип. 67. — С. 508–515.
3. *Theoretical bases of vibration diagnostics of anchor against landslide constructions / N. Bouraou, Iu. Klofa, Yu. Zsukovskij, E. Kulish // Vibrations in Physical Systems. — 2010. — 24. — P. 63–68.*
4. *Сопротивление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г. С. Писаренко. — 4-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища шк., 1979. — 696 с.*
5. *Демченко А. И., Яйцов А. А.* Результаты испытаний сталеполлимерных анкеров на вытягивание в сложных горно-геологических условиях // Наукові праці УкрНМДІ НАН України. — 2007. — № 1. — С. 239–247.

Поступила в редакцию
18.03.2011



6-9 сентября 2011 г.,

г. Сумы, Украина

XIII Международная научно-техническая конференция "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования"

Международный форум "Компьютерное моделирование, проектирование, изготовление и эксплуатация насосного оборудования"

Организаторы

Сумский государственный университет, Украина
Управляющая компания "ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И СИСТЕМЫ", Москва, Россия
Ассоциация компрессорщиков и пневматиков, Санкт-Петербург, Россия
Технологический Университет, Кельце, Польша
Словацкий технологический университет, Братислава, Словакия
Технологический университет, Гливице, Польша
Орловский государственный технический университет, Россия

Тематика

- ▶ Проблемы снижения стоимости жизненного цикла насосного и компрессорного оборудования
- ▶ Уплотнения неподвижных, аксиально-подвижных соединений и вращающихся валов, повышение надежности и эффективности уплотнительных устройств насосов и компрессоров
- ▶ Вопросы гидрогазодинамики, оптимизации, динамики и прочности турбомашин и их узлов
- ▶ Снижение шума и вибрации, вибродиагностика и прогнозирование остаточного ресурса, балансировка и динамика роторов насосов и компрессоров
- ▶ Вопросы трибологии и метрологии опор и уплотнений, новые материалы и технологии
- ▶ Экологически безопасная эксплуатация насосного и компрессорного оборудования, проблемы энерго- и ресурсосбережения.

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина
Тел./Факс: +38(0542) 33-35-94
E-mail: hervicon@sumdu.edu.ua

ОАО "Сумский завод "Насосэнергомаш",
Привокзальная пл., 1, г. Сумы, 40011, Украина
Тел./Факс: +38(0542) 61-99-78
E-mail: otd@nempump.com
Web: www.hervicon.sumdu.edu.ua