

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	7
<b>1. ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ</b>	10
1.1. Общая характеристика сооружений специального назначения.....	11
1.1.1. Противооползневые и удерживающие сооружения.....	13
1.1.2. Берегозащитные сооружения.....	15
1.2. Анализ внешних факторов и воздействий, влияющих на изменение технического состояния элементов конструкций.....	17
1.2.1. Статические и динамические нагрузки.....	20
1.2.2. Термическое воздействие.....	21
1.2.3. Химические воздействия.....	21
1.3. Эксплуатационные повреждения элементов конструкций инженерных сооружений.....	22
<b>2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ</b>	26
2.1. Общая характеристика методов диагностики.....	26
2.2. Тенденции развития средств диагностики элементов конструкций инженерных сооружений.....	29
2.2.1. Датчики и приборы регистрации диагностических параметров.....	29
2.2.2. Диагностические системы и комплексы.....	31
2.2.3. Методики диагностики инженерных сооружений.....	32
2.3. Анализ существующих подходов и исследований по определению технического состояния инженерных сооружений специального назначения.....	33
2.4. Расчетные модели элементов конструкций для задач диагностики их состояния.....	39

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	7
<b>1. ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ</b>	10
1.1. Общая характеристика сооружений специального назначения.....	11
1.1.1. Противооползневые и удерживающие сооружения.....	13
1.1.2. Берегозащитные сооружения.....	15
1.2. Анализ внешних факторов и воздействий, влияющих на изменение технического состояния элементов конструкций.....	17
1.2.1. Статические и динамические нагрузки.....	20
1.2.2. Термическое воздействие.....	21
1.2.3. Химические воздействия.....	21
1.3. Эксплуатационные повреждения элементов конструкций инженерных сооружений.....	22
<b>2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ</b>	26
2.1. Общая характеристика методов диагностики.....	26
2.2. Тенденции развития средств диагностики элементов конструкций инженерных сооружений.....	29
2.2.1. Датчики и приборы регистрации диагностических параметров.....	29
2.2.2. Диагностические системы и комплексы.....	31
2.2.3. Методики диагностики инженерных сооружений.....	32
2.3. Анализ существующих подходов и исследований по определению технического состояния инженерных сооружений специального назначения.....	33
2.4. Расчетные модели элементов конструкций для задач диагностики их состояния.....	39

2.4.1	Стержневые модели элементов конструкций.....	40
2.4.2.	Конечно-элементные модели элементов конструкций.....	41
<b>3.</b>	<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....</b>	<b>45</b>
3.1.	Разработка и анализ дискретных моделей отдельных элементов конструкций противоползневое сооружения.....	45
3.1.1	Дискретные модели балок.....	45
3.1.2.	Дискретные модели пластин .....	49
3.1.2.1.	Колебания свободной пластины.....	52
3.1.2.2.	Колебания жестко закрепленной по периметру пластины.....	55
3.2.	Моделирование повреждений в элементах конструкций.....	59
3.2.1.	Расчетные модели элементов конструкций с локальными повреждениями .....	61
3.2.2.	Моделирование трещин в элементах конструкций .....	62
3.2.2.1.	Моделирование трещины в балках.....	63
3.2.2.2.	Моделирование трещины в пластине.....	64
3.3.	Анализ влияния повреждения на собственные частоты и формы колебаний элементов конструкций.....	65
3.3.1.	Влияние трещины на собственные частоты и формы коле- баний балок .....	65
3.3.2.	Влияние трещины на собственные частоты и формы коле- баний пластины.....	70
<b>4.</b>	<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТИВОПОЛЗНЕВОГО АНКЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ .....</b>	<b>75</b>
4.1.	Теоретическое обоснование и разработка дискретной диагности- ческой модели противоползневое анкерного сооружения.....	75
4.2.	Анализ влияния изменения технического состояния анкера на	

2.4.1	Стержневые модели элементов конструкций.....	40
2.4.2.	Конечно-элементные модели элементов конструкций.....	41
<b>3.</b>	<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....</b>	<b>45</b>
3.1.	Разработка и анализ дискретных моделей отдельных элементов конструкций противоползневое сооружения.....	45
3.1.1	Дискретные модели балок.....	45
3.1.2.	Дискретные модели пластин .....	49
3.1.2.1.	Колебания свободной пластины.....	52
3.1.2.2.	Колебания жестко закрепленной по периметру пластины.....	55
3.2.	Моделирование повреждений в элементах конструкций.....	59
3.2.1.	Расчетные модели элементов конструкций с локальными повреждениями .....	61
3.2.2.	Моделирование трещин в элементах конструкций .....	62
3.2.2.1.	Моделирование трещины в балках.....	63
3.2.2.2.	Моделирование трещины в пластине.....	64
3.3.	Анализ влияния повреждения на собственные частоты и формы колебаний элементов конструкций.....	65
3.3.1.	Влияние трещины на собственные частоты и формы коле- баний балок .....	65
3.3.2.	Влияние трещины на собственные частоты и формы коле- баний пластины.....	70
<b>4.</b>	<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТИВОПОЛЗНЕВОГО АНКЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ .....</b>	<b>75</b>
4.1.	Теоретическое обоснование и разработка дискретной диагности- ческой модели противоползневое анкерного сооружения.....	75
4.2.	Анализ влияния изменения технического состояния анкера на	

параметры напряженно-деформированного состояния противооползневое сооружения.....	80
4.2.1 Анализ перемещений противооползневое сооружения....	80
4.2.2. Анализ напряжений в элементах конструкции противооползневое сооружения.....	82
4.2.3. Анализ деформаций в элементах конструкции противооползневое сооружения.....	83
4.3. Анализ собственных частот дискретной модели противооползневое анкерного сооружения .....	84
4.3.1. Анализ собственных частот колебаний стержня анкера.....	85
4.3.2. Колебания анкера с закрепленным по всей длине стержнем	87
4.3.3. Колебания анкера с закрепленным замком и свободной подпорной стенкой.....	89
4.3.4. Анализ собственных частот дискретной модели подпорной стенки противооползневое анкерного сооружения.....	90
4.4. Разработка и исследование дискретной модели многоанкерной конструкции противооползневое сооружения.....	92
4.4.1. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от условий закрепления их замковых устройств.....	93
4.4.2. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от дефектов закрепления и жесткости стержней.....	96
4.4.3. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от жесткости стержней.....	98
<b>5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ АНКЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>101</b>
5.1. Обоснование метода диагностики противооползневых сооружений.....	101
5.2. Описание многоканальной системы вибрационной диагностики..	103

параметры напряженно-деформированного состояния противооползневое сооружения.....	80
4.2.1 Анализ перемещений противооползневое сооружения....	80
4.2.2. Анализ напряжений в элементах конструкции противооползневое сооружения.....	82
4.2.3. Анализ деформаций в элементах конструкции противооползневое сооружения.....	83
4.3. Анализ собственных частот дискретной модели противооползневое анкерного сооружения .....	84
4.3.1. Анализ собственных частот колебаний стержня анкера.....	85
4.3.2. Колебания анкера с закрепленным по всей длине стержнем	87
4.3.3. Колебания анкера с закрепленным замком и свободной подпорной стенкой.....	89
4.3.4. Анализ собственных частот дискретной модели подпорной стенки противооползневое анкерного сооружения.....	90
4.4. Разработка и исследование дискретной модели многоанкерной конструкции противооползневое сооружения.....	92
4.4.1. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от условий закрепления их замковых устройств.....	93
4.4.2. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от дефектов закрепления и жесткости стержней.....	96
4.4.3. Анализ собственных частот анкеров в зависимости от жесткости стержней.....	98
<b>5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ АНКЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>101</b>
5.1. Обоснование метода диагностики противооползневых сооружений.....	101
5.2. Описание многоканальной системы вибрационной диагностики..	103

5.3. Методика и условия проведения экспериментальных исследований.....	105
5.4. Вибрационные исследования элементов конструкций противоположных анкерных сооружений .....	110
5.4.1. Результаты исследования вибрационных характеристик при возведении противоположного сооружения .....	110
5.4.2. Результаты исследований эксплуатируемых противоположных анкерных сооружений по результатам периодических наблюдений.....	113
5.5. Использование избыточной информации для совершенствования методики наблюдений .....	115
5.6. Определение перемещений подпорной стенки противоположного сооружения.....	118
5.6.1. Определение перемещений при испытаниях анкеров.....	119
5.6.2. Разработка способа измерений малых перемещений для определения технического состояния противоположного сооружения.....	122
5.7. Обработка информации и интерпретация результатов диагностики.....	124
5.7.1. Обобщенный алгоритм диагностики.....	124
5.7.2. Оценивание параметра изменения технического состояния по результатам диагностики.....	126
5.7.2.1. Метод максимального правдоподобия.....	126
5.7.2.2. Оценивание параметра состояния анкера по изменению собственных частот.....	129
5.7.2.3. Оценивание параметра состояния анкера по изменению микроперемещений подпорной стенки.....	131
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>134</b>

5.3. Методика и условия проведения экспериментальных исследований.....	105
5.4. Вибрационные исследования элементов конструкций противоположных анкерных сооружений .....	110
5.4.1. Результаты исследования вибрационных характеристик при возведении противоположного сооружения .....	110
5.4.2. Результаты исследований эксплуатируемых противоположных анкерных сооружений по результатам периодических наблюдений.....	113
5.5. Использование избыточной информации для совершенствования методики наблюдений .....	115
5.6. Определение перемещений подпорной стенки противоположного сооружения.....	118
5.6.1. Определение перемещений при испытаниях анкеров.....	119
5.6.2. Разработка способа измерений малых перемещений для определения технического состояния противоположного сооружения.....	122
5.7. Обработка информации и интерпретация результатов диагностики.....	124
5.7.1. Обобщенный алгоритм диагностики.....	124
5.7.2. Оценивание параметра изменения технического состояния по результатам диагностики.....	126
5.7.2.1. Метод максимального правдоподобия.....	126
5.7.2.2. Оценивание параметра состояния анкера по изменению собственных частот.....	129
5.7.2.3. Оценивание параметра состояния анкера по изменению микроперемещений подпорной стенки.....	131
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>134</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Территория Украины подвержена действию экзогенных геологических процессов (оползни, обвалы, подтопление, карст и др.), что обусловлено её геологическим строением и геоморфологическими условиями. В последние десятилетия наиболее распространенными среди указанных опасных геологических процессов являются оползневые процессы, количество которых уже превысило 20 тыс. и постоянно увеличивается. Развитие и распространение оползневых процессов обусловлены как влиянием природных факторов (метеорологические, гидрологические, гидрогеологические, сейсмические факторы), так и непосредственным или опосредованным влиянием хозяйственной деятельности людей (техногенные факторы).

На сегодняшний день оползневые процессы распространены на побережьях Черного и Азовского морей, в Закарпатской, Ивано-Франковской, Одесской, Полтавской, Черновицкой и др. областях. Практически на всех территориях активизация оползневых процессов приводит к разрушениям объектов инфраструктуры, значительным материальным убыткам, наносит непоправимый урон окружающей среде, зачастую приводит к человеческим жертвам. Для предотвращения катастрофических последствий оползневых процессов в соответствии с ДБН В.1.1-3-97 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов» проводятся комплексные мероприятия инженерно-технического, организационного и социального характера, которые направлены на обеспечение защиты территорий и объектов, регулирование гравитационных процессов на склонах и предотвращение чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

К инженерно-техническим мероприятиям защиты территорий от оползней относятся разработка, установление и эксплуатация инженерных сооружений специального назначения - противооползневых и удерживающих защитных сооружений. Такие сооружения предназначены для предотвращения оползневых

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Территория Украины подвержена действию экзогенных геологических процессов (оползни, обвалы, подтопление, карст и др.), что обусловлено её геологическим строением и геоморфологическими условиями. В последние десятилетия наиболее распространенными среди указанных опасных геологических процессов являются оползневые процессы, количество которых уже превысило 20 тыс. и постоянно увеличивается. Развитие и распространение оползневых процессов обусловлены как влиянием природных факторов (метеорологические, гидрологические, гидрогеологические, сейсмические факторы), так и непосредственным или опосредованным влиянием хозяйственной деятельности людей (техногенные факторы).

На сегодняшний день оползневые процессы распространены на побережьях Черного и Азовского морей, в Закарпатской, Ивано-Франковской, Одесской, Полтавской, Черновицкой и др. областях. Практически на всех территориях активизация оползневых процессов приводит к разрушениям объектов инфраструктуры, значительным материальным убыткам, наносит непоправимый урон окружающей среде, зачастую приводит к человеческим жертвам. Для предотвращения катастрофических последствий оползневых процессов в соответствии с ДБН В.1.1-3-97 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов» проводятся комплексные мероприятия инженерно-технического, организационного и социального характера, которые направлены на обеспечение защиты территорий и объектов, регулирование гравитационных процессов на склонах и предотвращение чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

К инженерно-техническим мероприятиям защиты территорий от оползней относятся разработка, установление и эксплуатация инженерных сооружений специального назначения - противооползневых и удерживающих защитных сооружений. Такие сооружения предназначены для предотвращения оползневых

процессов, когда невозможно или экономически нецелесообразно изменить рельеф склона. В общем случае они воспринимают оползневое давление за счет реактивного сопротивления устойчивого грунта по поверхностям опор глубокого залегания, а также не допускают продавливание и переползание через них оползневого массива. Надежность, безопасность и безотказность при эксплуатации противооползневых защитных сооружений в значительной степени определяет безопасность эксплуатации всех зданий и сооружений, расположенных на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями.

В настоящее время противооползневые сооружения проектируются с использованием различных типов конструкций, к которым, как правило, относятся сваи (балки), анкеры и плиты. Наибольшее распространение получили противооползневые анкерные сооружения, конструкция которых может содержать от одного до нескольких рядов анкеров глубокого залегания (до 30 м) с подпорными стенками (прижимными плитами). Важной характеристикой обеспечения поддерживающей и защитной функции при установке анкеров является их начальное натяжение, которое полагается неизменным на протяжении всего периода эксплуатации противооползневого сооружения. Однако, при несовершенстве операций установки анкеров и под влиянием оползневых процессов натяжение стержней анкеров со временем может изменяться, вследствие чего может произойти потеря зацепления якоря (корня) анкера с горными породами или, в редких случаях, разрыв его стержня. Таким образом, может произойти разрушение конструкции противооползневого анкерного сооружения без каких-либо видимых внешних признаков изменения его технического функционального состояния. Поэтому важной задачей при эксплуатации противооползневых анкерных сооружений является периодический контроль натяжения стержней анкеров, что позволит определить текущее техническое состояние противооползневых анкерных сооружений и их способность выполнять удерживающую и защитную функцию, а также оценить состояние оползневых процессов и спрогнозировать их дальнейшее развитие.

процессов, когда невозможно или экономически нецелесообразно изменить рельеф склона. В общем случае они воспринимают оползневое давление за счет реактивного сопротивления устойчивого грунта по поверхностям опор глубокого залегания, а также не допускают продавливание и переползание через них оползневого массива. Надежность, безопасность и безотказность при эксплуатации противооползневых защитных сооружений в значительной степени определяет безопасность эксплуатации всех зданий и сооружений, расположенных на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями.

В настоящее время противооползневые сооружения проектируются с использованием различных типов конструкций, к которым, как правило, относятся сваи (балки), анкеры и плиты. Наибольшее распространение получили противооползневые анкерные сооружения, конструкция которых может содержать от одного до нескольких рядов анкеров глубокого залегания (до 30 м) с подпорными стенками (прижимными плитами). Важной характеристикой обеспечения поддерживающей и защитной функции при установке анкеров является их начальное натяжение, которое полагается неизменным на протяжении всего периода эксплуатации противооползневого сооружения. Однако, при несовершенстве операций установки анкеров и под влиянием оползневых процессов натяжение стержней анкеров со временем может изменяться, вследствие чего может произойти потеря зацепления якоря (корня) анкера с горными породами или, в редких случаях, разрыв его стержня. Таким образом, может произойти разрушение конструкции противооползневого анкерного сооружения без каких-либо видимых внешних признаков изменения его технического функционального состояния. Поэтому важной задачей при эксплуатации противооползневых анкерных сооружений является периодический контроль натяжения стержней анкеров, что позволит определить текущее техническое состояние противооползневых анкерных сооружений и их способность выполнять удерживающую и защитную функцию, а также оценить состояние оползневых процессов и спрогнозировать их дальнейшее развитие.

Авторы предлагают решить задачу контроля натяжения стержней анкеров и определения технического состояния противоположных сооружений во время эксплуатации на основе развития и усовершенствования методов вибрационной диагностики. В монографии приведены результаты исследования диагностических моделей как отдельных элементов конструкций, так и противоположного сооружения в целом, на основании которых установлено влияние изменения натяжения стержней анкеров на параметры напряженно-деформированного состояния и на модальные характеристики анкеров и подпорных стенок. По результатам теоретического обоснования и модельных экспериментов, а также с учетом ограничений, накладываемых конструкцией противоположных сооружений на возможность практической реализации метода диагностики, определены диагностические признаки изменения натяжения стержней анкеров в эксплуатации. Разработанный метод диагностики успешно апробирован на многоанкерных противоположных сооружениях в АР Крым.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору М.В. Карускевичу и доктору технических наук, профессору А.П. Полякову, чьи замечания при рецензировании рукописи способствовали улучшению качества книги.

Авторы предлагают решить задачу контроля натяжения стержней анкеров и определения технического состояния противоположных сооружений во время эксплуатации на основе развития и усовершенствования методов вибрационной диагностики. В монографии приведены результаты исследования диагностических моделей как отдельных элементов конструкций, так и противоположного сооружения в целом, на основании которых установлено влияние изменения натяжения стержней анкеров на параметры напряженно-деформированного состояния и на модальные характеристики анкеров и подпорных стенок. По результатам теоретического обоснования и модельных экспериментов, а также с учетом ограничений, накладываемых конструкцией противоположных сооружений на возможность практической реализации метода диагностики, определены диагностические признаки изменения натяжения стержней анкеров в эксплуатации. Разработанный метод диагностики успешно апробирован на многоанкерных противоположных сооружениях в АР Крым.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору М.В. Карускевичу и доктору технических наук, профессору А.П. Полякову, чьи замечания при рецензировании рукописи способствовали улучшению качества книги.