

скважины очистных горных работ. Было замечено, что во многих скважинах имеет место повышение уровня воды после момента, когда скважина оказывается в зоне влияния ведения очистных горных работ, и уровень увеличивается по мере уменьшения расстояния от скважины до забоя.

В рамках решения задачи было проведено численное моделирование процессов изменения НДС вышележащих слоев ГМТ, включающее моделирование изменения давления в системе пор. Апробируемые скважинами подтолщи ГМТ относятся к слабоводоносным [3] и рассматриваются как пористая среда. Изменение порового давления вычисляется согласно модели Био [4]:

$$\sigma_{ij} = E_{ij}\varepsilon_{ij} - \alpha_b p_f \delta_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; E_{ij} E_{ij} – компоненты тензора упругости скелета; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; α_b – коэффициент Био; p_f – давление жидкости в порах. Течение жидкости определяется согласно закону Дарси.

Численное моделирование состоит из следующих этапов: 1) определение поля перемещений и напряжений, снимаемое на границах апробируемой водоносной подтолщи (ГМТ) и водоупорных толщ (ГМТ и ГПП); 2) определение изменения порового давления жидкости в водоносной толще, вызванного изменением ее НДС; 3) расчет прироста уровня воды в скважине на основании полученных значений порового давления в водоносной толще.

В результате проведенного исследования была установлена выраженная зависимость уровня воды в скважинах гидрогеологической разведки при ведении очистных горных работ в их окрестности. Проведенное исследование позволило составить модель геомеханического состояния водонасыщенных подрабатываемых породных массивов, учитывающую гидродинамическую компоненту при расчете напряженного состояния породного скелета, которая подтверждается данными натурных наблюдений изменения уровня подземных вод в гидрогеологических наблюдательных скважинах.

Список литературы

- 1 Геотермический мониторинг в районе краснослободского разлома припятского прогиба / В. И. Зуй, В. П. Ильин, М. А. Дубаневич, Е. А. Василёнок // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. – 2017. – С. 23–26.
- 2 Певзнер, М. Е. Геомеханика / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – М. : Изд-во МГГУ, 2008. – 437 с.
- 3 Поливко, Л. А. Палеогидрогеология надсолевой глинисто-мергелистой толщи Старобинского месторождения калийных солей / Л. А. Поливко // Літасфера. – 2019. – № 2. – С. 90–106.
- 4 Многомасштабное геомеханическое моделирование с учетом эволюции микроструктуры геосреды / А. В. Вершинин, К. М. Зингерман, В. А. Левин [и др.] // Геофизические технологии. – 2024. – № 1. – С. 105–117.

УДК 625.8

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «SOFT-MOST»

А. А. ПОДДУБНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Е. Н. КИЛЬЧЕНКО

ООО «ИнноТех Солюшнс», г. Минск, Республика Беларусь

Разрабатываемый программный комплекс «SoftIT-Most» предназначен для автоматизации оперативного и технического контроля технологических процессов транспортной инфраструктуры в реальном времени, включая нормальные, переходные и аварийные режимы, и успешно решает задачи непрерывного мониторинга мостов.

В Республике Беларусь насчитывается более пяти тысяч мостовых сооружений, общая протяженность которых свыше 185 тысяч метров.

Износ конструкций любого мостового сооружения происходит в зависимости от условий его эксплуатации. Грузоподъемность мостов и путепроводов, их безопасная эксплуатация постепенно снижаются за счет повреждений из-за интенсивности движения и увеличения тяжеловесности транспорта, а также влияния погодных-климатических факторов.

В Республике Беларусь вопросами непрерывного контроля мостовых сооружений занимается отраслевая мостовая лаборатория «БелдорНИИ». Автоматизированная система мониторинга состоит из комплекта датчиков контроля, установленных на конструктивных элементах мостовых сооружений, данные из которых посредством GSM-сигнала передаются на сервер организации, которая ведет контроль. Вся аппаратная часть систем мониторинга изготовлена в Республике Беларусь. В настоящее время в стране действуют два центра мониторинга. Первый, созданный на базе «Горавтомоста», занимается эксплуатацией мостов и путепроводов Минска. Вторым, под управлением «Белдорсвязи», следит за состоянием мостов на республиканских автодорогах.

Однако данные разработанных систем не показывают, как дефекты влияют на работу всего моста и его отдельных элементов в реальном времени. Для непрерывного контроля состояния мостов необходимы системы постоянного мониторинга, которые отслеживают условия эксплуатации и поведение конструкций, обеспечивая их функциональность в заданных пределах.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы был проведен обзор существующих решений мониторинга состояния мостовых сооружений в Республике Беларусь и за рубежом (Российской Федерации, США, Японии, Европе, Южной Кореи).

Для совершенствования белорусской системы мониторинга мостовых сооружений целесообразно внедрить передовые международные решения, которые повысят безопасность, долговечность и экономическую эффективность эксплуатации более чем 5 тысяч мостов в Республике Беларусь. Рекомендуется использовать волоконно-оптические датчики «SOFO» (Швейцария), как на мосту «Сигенталь», для высокоточного измерения деформаций и кривизны конструкций с микронной точностью, что особенно важно для мостов с высокой транспортной нагрузкой. GPS-оборудование, примененное на мосту «Акэси Кэйкаё» (Япония), позволит отслеживать смещения ключевых элементов (опор, пролетов) в трех направлениях, обеспечивая контроль долгосрочных деформаций. Акселерометры и сейсмометры, как на мостах «Коммодор Джон Бэрри» (США) и «Акэси Кэйкаё», помогут анализировать вибрации и сейсмические воздействия, что актуально для регионов с потенциальными природными рисками.

Модульная архитектура, реализованная в российском комплексе «СМИС Эксперт», обеспечит гибкость системы, позволяя добавлять новые датчики в зависимости от специфики объекта. Единая платформа для сбора и анализа данных, как в системах США и России, с визуализацией по принципу «светофора» (зеленый – норма, желтый – предупреждение, красный – авария), упростит мониторинг и принятие решений. Автоматизация с оповещениями (SMS, звуковые сигналы), как в Южной Корее (мост «Джиндо») и «СМИС Эксперт», обеспечит оперативное реагирование на критические изменения. Удаленный доступ через облачные технологии и беспроводную передачу данных (GSM, Интернет), как в Японии, позволит контролировать состояние мостов из любой точки, повышая эффективность работы центров мониторинга «Горавтомост» и «Белдорсвязь».

Обучение персонала, как подчеркивается в системах США и России, и регулярная калибровка датчиков, как на мосту «Сигенталь», гарантируют точность и надежность измерений. Система должна соответствовать белорусским нормативным требованиям, аналогично адаптации «СМИС Эксперт» к российским стандартам (СП 274.1325800.2016). Это обеспечит легитимность внедрения. Точный анализ данных, как в Южной Корее (мосты «Нэмхэ», «Сиохэ»), позволит оптимизировать расходы на ремонт, фокусируясь на приоритетных участках, и предотвратить аварии, как на «Коммодор Джон Бэрри», снижая экономические потери. Интеграция этих решений поддерживает цели, озвученные Министром транспорта и коммуникаций Алексеем Ляхновичем на 2025 год, по предотвращению критических дефектов и повышению надежности мостовой инфраструктуры [1].

Уникальность разработанной системы будет обеспечиваться разработанными собственными методиками по описанию динамических процессов в несущей системе конструкций, инициируемых внезапными повреждениями несущих конструкций, и внезапном повреждении основания (внезапное изменение структуры упругого основания), на которое опирается конструкция. Разработанные математические модели динамики конструктивно нелинейной системы взаимодействующих балки и основания позволяют произвести расчет характеристик динамического процесса, инициируемого трещинообразованием, внезапно изменяющим расчетную схему конструкции. Метод связывает уровни динамических приращений деформаций и внутренних усилий с характеристиками дефекта – глубиной и локализацией трещины. Эти результаты работы расширяют диапазон справочных дан-

ных для принятия конкретных конструктивно-технологических решений для выработки норм и стандартов на проектирование, возведение и эксплуатацию конструкций и сооружений. Решены новые задачи исследования динамического процесса во внецентренно сжатой свае, полностью погруженной в упругое основание, возбуждаемого частичной осадкой основания либо образованием подземной полости вокруг сваи (пузырь). Это обусловлено расширением исследования тонких и длинных свай для морских сооружений, мостов, путепроводов, эстакад и т. п., полностью или частично погруженных в многослойные основания, со значительной надземной частью, подверженных боковым, моментным и прочим нагрузкам. Построенная новая математическая модель динамического процесса, возбуждаемого в статически нагруженной системе конструкции внезапным изменением изгибной жесткости балки, предполагает, что изменяется либо модуль упругости материала балки, либо осевой момент инерции поперечного сечения балки при ее повороте на 90 градусов относительно продольной оси при сохранении направления нагрузки [2–5].

Проведенный анализ показывает, что мониторинг мостовых сооружений с точки зрения потребителей мостовых сооружений направлен на решение следующих важных задач:

- 1) обеспечение сохранности мостовых сооружений;
- 2) повышение долговечности мостовых сооружений путем своевременного обнаружения повреждений и их устранения;
- 3) сохранение грузоподъемности мостовых сооружений путем управления их поведением в процессе эксплуатации;
- 4) повышение эффективности расходования средств на проведение ремонтных мероприятий путем корректного определения времени и вида необходимого ремонта.

Список литературы

1 Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Ч. 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. И. Нигаматова, Е. С. Михалдыкин // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 2. – URL: <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (дата обращения: 10.09.2025). – DOI: 10.15862/01TS214.

2 **Poddubny, A. A.** Dynamic loading of the rod at a sudden change of elastic foundation structure / A. A. Poddubny, V. B. Gordon // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2021. – 1079, 042076. – DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042076.

3 **Поддубный, А. А.** Динамические догружения стержня при внезапном изменении структуры упругого основания / А. А. Поддубный, В. А. Гордон, Т. В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 2 (346). – С. 27–41.

4 **Поддубный, А. А.** Гордон Динамика конструктивно нелинейной системы «балка – основание» при внезапном образовании трещин / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 84–87.

5 Added stress of a cantilever under sudden alterations in its foundation / A. Poddubny, V. Gordon, N. Bakaeva, P. Morev // ADVANCES IN SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS : AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2497, 040002. – DOI: 10.1063/5.0103990.

УДК 517.958

ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ УЗКОГО КЛИНОВИДНОГО КАНАЛА, ВЫЗВАННЫЕ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ СЛОЕМ ЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НЕМ

В. С. ПОПОВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук –
обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра
«Саратовский научный центр РАН», Российская Федерация*

Л. И. МОГИЛЕВИЧ, А. А. ПОПОВА, Е. В. ЕВДОКИМОВА

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация

Математические модели взаимодействия жидкости с жесткими упруго закрепленными элементами конструкций играют важную роль при исследовании различных изделий современного транс-