

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС)

На правах рукописи



Полякова Любовь Александровна

**МОНИТОРИНГ РАЗМЫВОВ ГРУНТА У ОПОР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МОСТОВ ПО ЧАСТОТАМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Яшнов Андрей Николаевич

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 РАЗМЫВЫ ГРУНТА У ОПОР МОСТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЯ.....	12
1.1 Общие сведения о процессе размыва грунта у мостовых опор ..	12
1.2 Методики расчета глубины общего и местного размывов грунта у опор.....	17
1.2.1 Методика расчета глубины общего размыва	17
1.2.2 Методика расчета глубины местного размыва	21
1.3 Существующие способы обнаружения размывов грунта у опор мостов.	29
1.3.1 Отечественный опыт мониторинга размывов.....	29
1.3.2 Зарубежный опыт мониторинга размывов.....	32
Цели и задачи исследования	38
2ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПОР	40
2.1 Программа проведения экспериментальных исследований	40
2.2 Проведение экспериментов по определению частот собственных колебаний различных конструкций опор.....	51
2.3 Обработка данных экспериментальных исследований.....	58
Выводы по главе 2	66
3 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПОР	67
3.1 Аналитический подход к определению частоты собственных колебаний опоры	67
3.2 Моделирование опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания для расчета частот собственных колебаний.....	71
3.3 Расчетные зависимости частот собственных колебаний опор от глубины размыва	83

Выводы по главе 3	88
4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА МОНИТОРИНГА РАЗМЫВА ГРУНТА У ОПОРЫ	89
4.1 Алгоритм контроля глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний	89
4.1.1 Определение фактической частоты собственных колебаний опоры и глубины заложения фундамента	89
4.1.2 Моделирование природно-техногенной системы	92
4.1.3 Прогнозирование изменения частоты собственных колебаний природно-техногенной системы при развитии глубины размыва грунта у опоры	93
4.1.4 Определение граничных значений частоты собственных колебаний и условий дальнейшей эксплуатации.....	94
4.1.5 Алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний.....	95
4.2 Применение усовершенствованного способа обнаружения и контроля размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний.....	98
4.2.1 Пример применения усовершенствованного способа для свайной опоры железнодорожного моста через реку Н.....	98
4.2.2 Пример применения усовершенствованного способа для опоры на массивном фундаменте железнодорожного моста через реку М.....	105
4.3 Техничко-экономический эффект от применения усовершенствованного способа мониторинга	109
Выводы по главе 4	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В соответствии со статьей 36 Федерального закона Российской Федерации от 30.12.2009 № 384 безопасность мостовых сооружений в процессе эксплуатации должна обеспечиваться посредством проведения периодических осмотров, контрольных проверок и мониторинга состояния конструкций [100]. При осуществлении работ по обследованию конструкций оценивают эксплуатационную надежность транспортных сооружений [39] и дают рекомендации по устранению выявленных дефектов. Дефекты, влияющие на безопасность сооружения, могут образовываться в местах, труднодоступных для проведения осмотров (например, в подводной части опор и в подмостовом русле). Одним из таких дефектов является размыв грунта у русловых опор моста.

При проектировании мостового перехода производят расчет максимальной глубины размыва грунта у опоры и определяют необходимое заглубление подошвы фундамента опоры в грунт. Но этих мер зачастую оказывается недостаточно для безопасной эксплуатации моста. Это связано в первую очередь с тем, что расчетные характеристики водного потока за период эксплуатации сооружения могут существенно измениться по сравнению со значениями, принятыми на момент проектирования. Эти изменения связаны с изменениями климата [30], а также с изначально заложенной расчетом возможной вероятностью превышения расчетных характеристик водотока. Также в практике встречаются случаи, когда у опоры происходит размыв скального основания, изначально считающегося неразмываемым. Это обусловлено особенностью конкретного скального грунта, который при нарушении своей природной структуры (сооружении фундамента опор) разрушается до грунта, подверженного размывам. Исходя из этого, для обеспечения надежности мостового сооружения необходим периодический мониторинг размывов грунта у опор.

Согласно инструкции по гидрологическому мониторингу [38], на железнодорожных мостах сети ОАО «РЖД» размывы грунта выявляют путем измерений профилей русла и глубин в зоне местных размывов. Измерения проводят эхолотами, гидролокаторами или традиционными средствами (геодезическими рейками, гидрометрическими штангами, ручными и механическими лотами). Эти измерения выполняют два раза в год только на больших и внеклассных мостах. Как показывает практика, опасные размывы могут развиваться и на средних, и на малых мостах. На малых и средних мостах такие измерения проводят только при необходимости, выявление которой возможно по результатам комплексного подводно-технического обследования специализированной водолазной стацией, проводимого один раз в 10 лет и после ремонта подводной части опор. За 10 лет может образоваться размыв с глубиной, критичной для безопасной эксплуатации моста. Также все перечисленные способы выявления размывов грунта у опор обладают такими недостатками, как большая трудоемкость и невозможность проведения работ в паводок. Как известно, именно паводок является самым опасным промежутком времени для появления размывов грунта у опор мостов т.к. величина размыва напрямую зависит от глубины и скорости потока. Несвоевременное обнаружение размыва может повлечь за собой серьезные последствия. Опора может получить крен, либо полностью потерять устойчивость, вызвав обрушение пролетных строений [78]. Таким образом, **актуальность исследования** обусловлена отсутствием научно-обоснованного способа оперативной диагностики и мониторинга размывов грунта у русловых опор. А тот факт, что при развитии размыва изменяется свободная длина опоры, позволил выдвинуть **гипотезу** о зависимости частоты собственных колебаний природно-техногенной системы, состоящей из опоры, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений, от величины размыва грунта у опоры.

Степень разработанности темы исследования.

Отечественный опыт обнаружения и контроля размывов грунта у опор мостов сети ОАО «РЖД» сводится к традиционным методам, изложенным в нормативной документации [38, 40]. Работ отечественных ученых, направленных

на совершенствование традиционных способов обнаружения и контроля размывов, в открытых источниках не обнаружено. Однако, следует отметить исследования российских ученых, посвященные развитию методов диагностики неисправностей искусственных сооружений, в том числе и по динамическим параметрам: Т.М. Баранова, А.А. Белого, И.С. Бондаря, С.П. Глушкова, Н.А. Донца, Ю.В. Новака, В.Ю. Полякова, В.Н. Смирнова, Л.Ю. Соловьева, А.Н. Яшнова и др. В зарубежных странах, помимо традиционных способов обнаружения размывов грунта у опор (промеров глубин), ведутся исследования других возможных способов мониторинга. Влияние размывов грунта у опор на динамическую работу конструкций моста стало предметом изучения P. Borlenghi, T. Bao, Z. Liu, J.L. Briaud, C. Darby, S. Hurlebaus, K. Chang, H.Y. Huang, W.Y. Chou, S.H. Ju, C.W. Feng, Y. Ko, W. Lee, W. Chang, H. Mei, C. Chen, E.M. Laursen, A. Toch, T.H. Lin, C.A. Tsai, Y. Masui, O. Suzuki, T.K. Lin, L. Prendegast, D. Hester, K. Gavin, L.J. Tison, C. Yao и др. Но все эти исследования ведутся не системно, каждая работа посвящена узкому либо лабораторному, либо численному исследованию влияния отдельных параметров. Ввиду этого, результаты проводимых исследований не нашли применения в качестве единого способа мониторинга для натуральных объектов. Установлено, что апробированные на практике расчетные модели для вычисления собственных частот колебаний опоры с учетом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом, окружающим фундамент, отсутствуют.

Целью диссертационного исследования является совершенствование способа мониторинга размывов грунта у опор железнодорожных мостов за счёт контроля частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

– проведение натуральных измерений частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и

опирающихся на опоры пролетных строений, при различном конструктивном исполнении элементов и фактическом уровне грунта у опор;

- обоснование расчетных допущений при определении частоты собственных колебаний опоры с учётом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом, окружающим фундамент;

- разработка алгоритма мониторинга глубины размыва грунта у опор по частотам собственных колебаний.

Объектом исследования являются природно-техногенные системы, состоящие из русловых опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений железнодорожных мостов.

Предмет исследования – частоты собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из русловых опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений железнодорожных мостов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- установлены экспериментальные качественные и количественные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем различного конструктивного исполнения от глубины размыва грунта у опор;

- уточнена математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на неё пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях;

- предложен нетрадиционный подход к мониторингу глубины размыва грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний, учитывающий различия в конструктивном исполнении и инженерно-геологических условиях природно-техногенных систем.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Усовершенствована математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на неё пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях.

Установлены расчетные и экспериментальные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений, от глубины размыва, на основании которых разработана и внедрена усовершенствованная методика мониторинга глубины размыва грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний. Результаты исследований нашли практическое применение при комплексном подводно-техническом обследовании опор железнодорожных мостов Дальневосточной железной дороги.

Методология и методы исследования.

Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения совокупности теоретических и экспериментальных методов научного познания:

- проведение эксперимента с измерением частот собственных колебаний различных природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений;
- численное моделирование методом конечных элементов;
- выполнение теоретических исследований на основе экспериментальных данных и составленных математических моделей;
- анализ, сопоставление и синтез имеющихся теоретических и экспериментальных материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- экспериментальная методика определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и

опирающихся на опоры пролетных строений, позволившая выявить качественные и количественные зависимости частот собственных колебаний систем от глубины размыва;

– усовершенствованная математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на неё пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях, позволившая получить расчетные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем от глубины размыва грунта у опор;

– алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением поверенного измерительного оборудования и сертифицированного расчетного комплекса и подтверждена согласованностью результатов численных и экспериментальных исследований, воспроизводимостью результатов исследования.

Апробация основных результатов диссертационного исследования была выполнена на следующих конференциях:

– VII Международная научно-практическая конференция «Мосты и тоннели: теория, исследования, практика», г. Днепр, 1-2 октября 2020 г.;

– XI Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы», г. Новосибирск, 12-13 ноября 2020 г.;

– Всероссийская научно-практическая конференция «Эксплуатация, диагностика и ремонт мостов», посвященная актуальным вопросам эксплуатации дорожного комплекса, применительно к условиям ХМАО, г. Новосибирск, 21 октября 2021 г.;

– XII Международная научно-техническая конференции «Политранспортные системы», г. Новосибирск, 21-22 сентября 2022 г.;

– Международная научно-практическая конференция «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения», г. Санкт-Петербург, 10-11 ноября 2022 г.;

– Международная научно-практическая конференция СибНИИ мостов, посвященная памяти профессора, доктора технических наук Сергея Александровича Бокарева «Исследование, проектирование, строительство и эксплуатация мостов: проблемы и пути их решения на протяжении жизненного цикла», г. Новосибирск, 20-22 апреля 2023 г.;

– IV Международная научно-техническая конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов». Чтения, посвященные памяти Лавра Дмитриевича Проскурякова, г. Москва, 26-28 апреля 2023 г.;

– Международная научно-практическая конференция «Новые технологии в мостостроении. 140 лет кафедре «Мосты» ПГУПС», г. Санкт-Петербург, 18-19 мая 2023 г.

– Мероприятие-спутник конгресса молодых учёных в ЯНАО «Мерзлота, климат и проектные решения: технология адаптации к происходящим изменениям», г. Салехард, 12-14 декабря 2023 г.;

– XIV Международная научно-практическая конференция «Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения», г. Томск, 12-15 марта 2024 г.

Внедрение результатов.

Результаты исследований нашли практическое применение при комплексном подводно-техническом обследовании опор железнодорожных мостов Дальневосточной железной дороги. Данные, полученные в ходе работы, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО СГУПС в рамках дисциплины Б1.О.34 «Содержание и реконструкция мостов и тоннелей» для студентов

специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано шесть статей, в том числе четыре статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, зарегистрирован один патент на изобретение.

Личный вклад автора заключается в участии на всех этапах процесса научного исследования, в том числе непосредственном участии в натурных экспериментах; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; теоретических исследованиях, в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 135 страниц, работа содержит 62 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 143 источника, из которых 30 – на иностранных языках.

1 РАЗМЫВЫ ГРУНТА У ОПОР МОСТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЯ

1.1 Общие сведения о процессе размыва грунта у мостовых опор

Для пересечения транспортом постоянных больших и средних водотоков чаще всего устраивают мостовой переход. Мостовой переход состоит из непосредственно моста, предназначенного для пересечения водного препятствия, насыпей подходов к нему и регуляционных сооружений, откосы которых постоянно или периодически омываются водой. При строительстве мостового перехода происходит сужение водотока и, как следствие, изменение режима протекания. Это приводит к возникновению особых русловых деформаций, отличных от природных. Поскольку эти деформации, связанные со стеснением потока инженерным сооружением, неестественны, их называют принудительными русловыми деформациями.

При неблагоприятном развитии принудительных русловых деформаций возникает угроза устойчивости регуляционных сооружений и опор моста, при этом нормальная эксплуатация мостового перехода не обеспечивается. Наибольшую опасность для мостового сооружения представляет размыв русла именно у опор моста, который может повлечь за собой серьезные последствия. Опора может получить крен, либо полностью потерять устойчивость, вызвав обрушения пролетных строений.

Русловые деформации принудительного характера принято разделять на общие и местные. Общими русловыми деформациями (общими размывами) называются размывы, вызываемые стеснением потока подходами к мосту, устраиваемыми, чаще всего, на поймах рек. В результате строительства сооружения в подмостовой зоне происходит сжатие потока, увеличение турбулентности и скорости течения воды, и, как следствие, русло и пойменные участки отверстия моста размываются на всей ширине отверстия.

Размывы дна сжатого потока могут происходить по двум схемам. Первая схема возможна, если слагающие дно частицы грунта были неподвижны до увеличения скорости течения воды при сжатии. В этом случае размыв начнется тогда, когда донная скорость сжатого потока превысит неразмывающую скорость для этих частиц грунта. При размыве площадь сечения потока будет увеличиваться, а скорость уменьшаться. В результате размыв прекратится, как только донная скорость снизится снова до неразмывающей. Первая схема чаще всего характерна для пойменных участков отверстия моста. Реки, где до строительства мостового перехода при паводках грунты, слагающие поверхностные слои русла, не движутся, встречаются довольно редко как исключение. В подавляющем большинстве случаев наносы, слагающие дно русла, находятся в движении и размыв в этом случае происходит по второй схеме. В русле, где наносы, слагающие дно, движутся и до стеснения потока, размыв является уже не следствием превышения неразмывающей скорости, которая всегда превышена, а результатом нарушения продольного баланса в движении наносов. В бытовом состоянии (до стеснения) река несет по руслу некоторый определенный расход донных наносов, обычно той же крупности, что и слагающие дно частицы грунта русла. Этот расход наносов соответствует транспортирующей способности потока до его стеснения. После стеснения водотока подходами к мосту транспортирующая способность потока в русле на участке сжатия увеличивается, так как скорость течения возрастает. Между фактическим притоком наносов к месту стеснения, т.е. к створу моста, и выносом их из-под моста потоком с увеличением транспортирующей способности наступает разрыв. Дефицит притока наносов покрывается при этом за счет разрушения дна русла, т.е. за счет вовлечения в движение при размыве новых масс наносов. Увеличение площади сечения потока при размыве приводит к снижению скорости течения и одновременно к снижению транспортирующей способности, зависящей от этой скорости. Размыв прекратится, как только транспортирующая способность стесненного потока окажется равной притоку наносов к месту стеснения, т.е. когда восстановится продольный баланс в движении наносов. Скорость потока останется при этом по-прежнему выше

неразмывающей и будет соответствовать бытовому транзитному движению наносов [1].

Местные русловые деформации (местные размывы) развиваются только на отдельных участках в результате локального нарушения структуры водного потока при обтекании конструкций мостовых сооружений и проявляются в виде местных воронкообразных углублений дна. Наиболее характерными местами появления местного размыва являются области у опор мостов и голов выдвинутых в поток струенаправляющих сооружений. Процесс образования местного размыва проиллюстрирован на рисунке 1.1 и заключается в следующем. Струи потока, ударяясь об опору с верховой стороны, расслаиваются и меняют свое направление. Струи верхней толщи потока создают по ширине опоры стоячую волну набега, а струи средней и нижней частей, опускаясь и отталкиваясь от дна, закручиваются в вихрь (валец). Данный вихрь, подковообразно обхватывая опору, переносит значительную долю частиц грунта в низовую сторону опоры. Наименьшая доля частиц, захваченная вихрем, опускается на верховой откос воронки и сползает на ее дно. Максимальная глубина воронки размыва образуется с верховой стороны опоры при объединении боковых размывов с размывами у лобовой грани опоры [34]. На рисунке 1.2 представлен фрагмент фактического поперечного профиля дна русла реки по главному створу (по носовым граням опор), полученный по результатам обследования сотрудниками СибНИИ мостов, в том числе и с участием автора в работах по определению размывов, на котором видны характерные местные углубления у каждой опоры.

Причина, порождающая местный размыв, позволяет определять величину размыва через гидравлические параметры водного потока и размеры обтекаемого сооружения (опоры) и рассматривать местные размывы отдельно от размывов, связанных с общим стеснением потока сооружением [2].

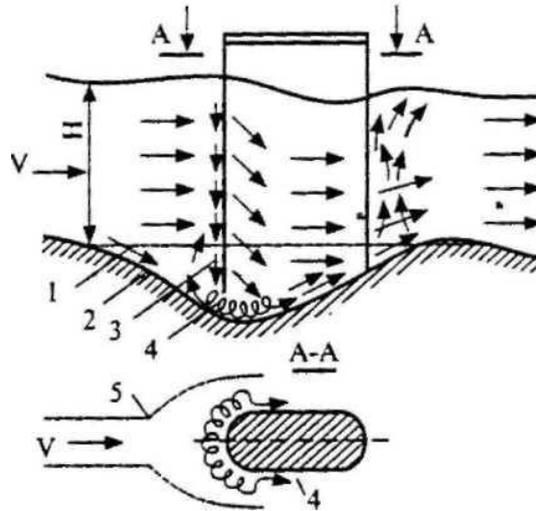


Рисунок 1.1 – Схема образования местного размыва грунта у опоры [101]:
 1 – дно до размыва; 2 – откос воронки размыва; 3 – нисходящие течения; 4 – донные вихревые вальцы; 5 – струи, обтекающие опору; H – глубина потока; v – скорость потока

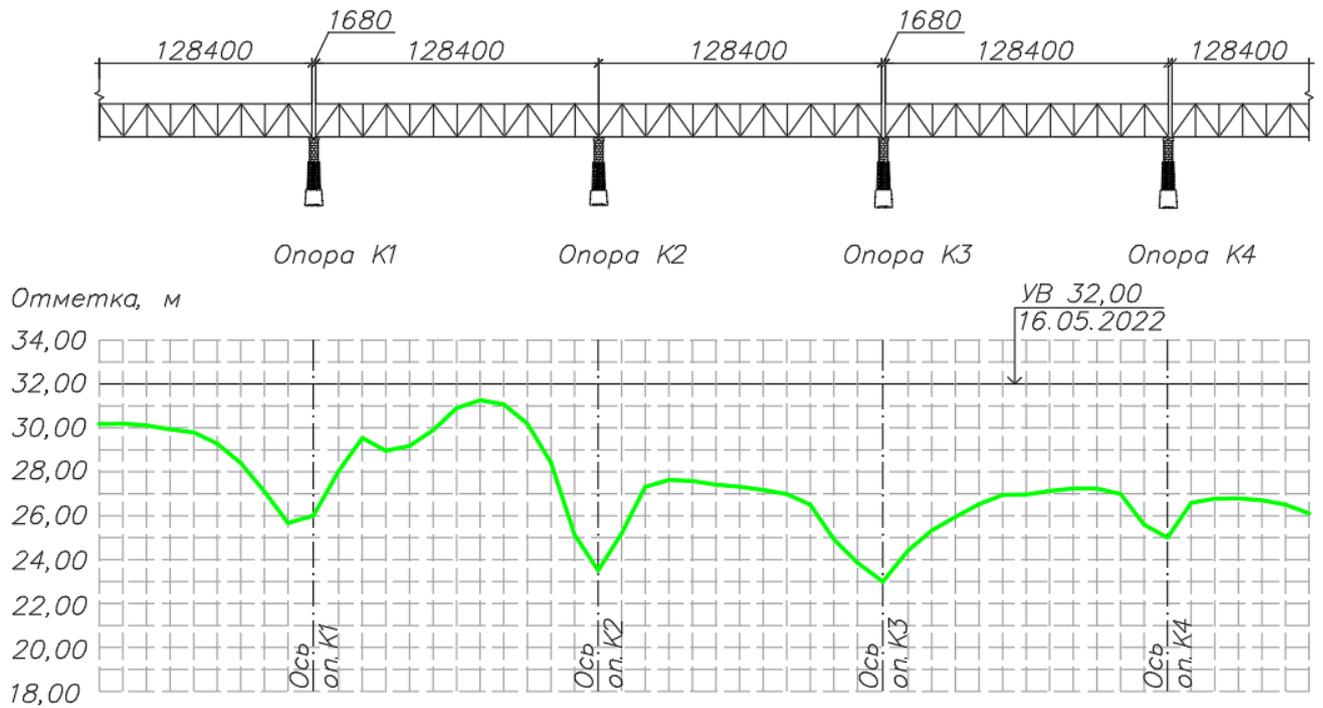


Рисунок 1.2 – Фрагмент поперечного профиля дна русла по главному створу

Наилучшим средством защиты опор от опасных размывов является надлежащее заглубление фундаментов в грунт. Любые меры защиты эксплуатационного характера будут эффективны только в том случае, если их назначение базируется на правильном учете русловых деформаций, размеры которых могут измениться в том числе и в связи с выполнением работ по защите

опор. Любые ремонтные работы, производимые в русловой части моста, должны выполняться с учетом прогнозирования размывов. На рисунке 1.3 представлены неблагоприятные последствия выполнения работ по капитальному ремонту моста без учета факторов, влияющих на величину русловых деформаций. При устройстве усиления русловых опор железобетонными рубашками не учтено сужение живого сечения русла реки, что повлекло за собой увеличение размыва грунта у опоры. За счет увеличения глубины размыва несущая способность грунта основания снизилась до недопустимых значений и повлекла за собой разрушение грунта, что в совокупности с местными размывами привело к недопустимым кренам и смещениям опор. Исходя из вышесказанного, устранение опасности размыва грунта у опор возможно при прогнозировании русловых деформаций, заключающемся в расчете максимальных глубин размывов дна русла реки.



Рисунок 1.3 – Последствия некорректного учета факторов, влияющих на глубину размыва

1.2 Методики расчета глубины общего и местного размывов грунта у опор

В работе использованы следующие понятия.

Бытовой уровень грунта – уровень грунта, установившийся в процессе природного изменения русла до строительства мостового перехода.

Глубина общего размыва (h_o) – величина размыва, вызванного стеснением потока подходами к мосту, отсчитываемая от бытового уровня грунта.

Глубина местного размыва (h_m) – величина размыва, вызванного локальным нарушением структуры потока, отсчитываемая от уровня грунта после общего размыва.

Глубина размыва (h_p) – суммарная величина общего и местного размывов, отсчитываемая от бытового уровня грунта и вычисляемая по формуле:

$$h_p = h_o + h_m. \quad (1.1)$$

Схема для определения глубины размыва приведена на рисунке 1.4.

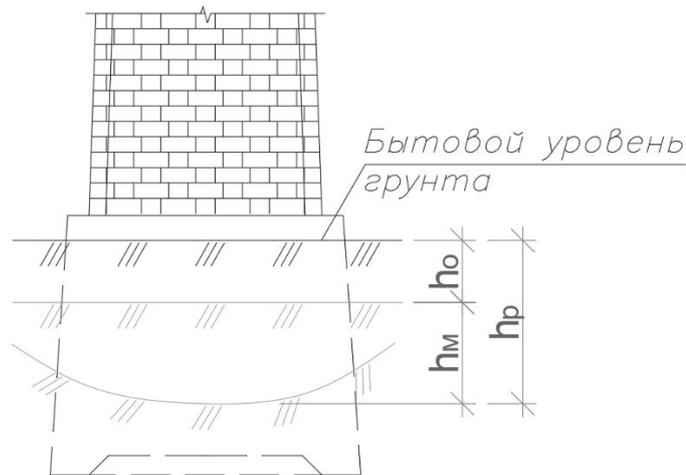


Рисунок 1.4 – Схема для определения глубины размыва грунта у опоры

1.2.1 Методика расчета глубины общего размыва

Ширина подмостового поперечного сечения потока в общем случае делится на две характерные части: русло B_p и пойменный участок (или участки) $B_{п}$, представленные на рисунке 1.5 а. До стеснения потока по руслу и пойменным

участкам отверстия моста L_M проходят бытовые расходы воды $Q_{pб}$ и $Q_{пб}$, сумма которых меньше полного расхода реки Q , так как некоторая доля воды протекает на остальной части ширины пойм (рисунок 1.5 б). После перекрытия этой части ширины пойм незатопляемыми насыпями подходов к мосту по характерным участкам сжатого подмостового сечения реки будут проходить увеличенные расходы воды $Q_{pм}$ и $Q_{пм}$, сумма которых равна полному расходу реки Q . Увеличение величин расходов называется сливом воды в отверстие моста с участков пойм, перекрытых незатопляемыми насыпями [2]. Коэффициенты возрастания расходов в русле и на пойменных участках отверстия моста могут быть определены по формулам [2]:

$$\beta_p = \frac{Q_{pм}}{Q_{pб}}; \quad (1.2)$$

$$\beta_{п} = \frac{Q_{пм}}{Q_{пб}}. \quad (1.3)$$

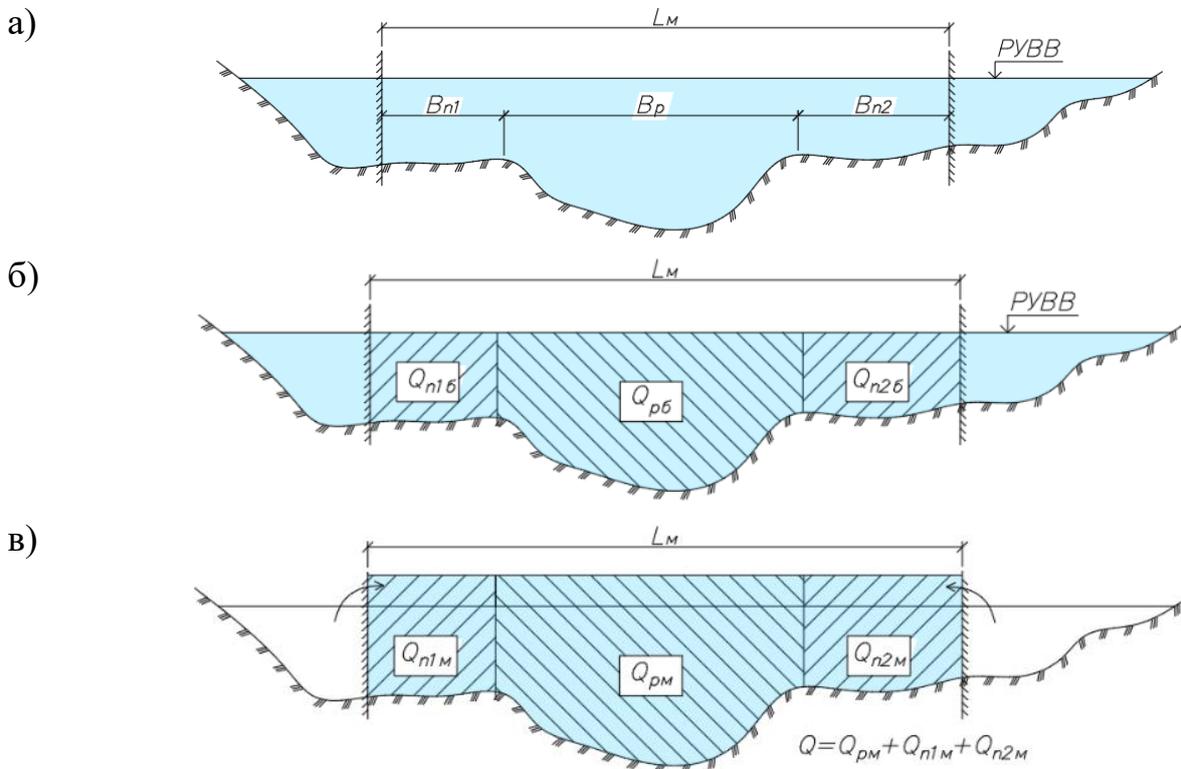


Рисунок 1.5 – Схемы к расчету общего размыва под мостом: а) характерные части подмостового поперечного сечения потока; б) бытовые расходы воды под мостом до стеснения потока; в) увеличенные расходы воды под мостом после стеснения потока насыпями подходов

Ввиду того, что процесс размыва, а также причины его прекращения в русле и на пойменных участках отверстия моста различны, расчет глубины общего размыва на этих участках производится по-разному.

На пойменных участках отверстия моста, для которых в бытовых условиях характерна неподвижность слагающих дно частиц грунта, размыв начнется только при условии, что скорость стесненного потока превысит неразмывающую скорость. Прекратится же размыв после того, как снижающаяся по мере размыва скорость станет равна неразмывающей. Тогда глубина общего размыва на пойменном участке отверстия моста определяется по формуле [2]:

$$h_{\text{по}} = \frac{Q_{\text{пм}}}{B_{\text{п}} \cdot v_{\text{нер}}} - H_{\text{пб}}, \quad (1.4)$$

где $H_{\text{пб}}$ – средняя бытовая глубина потока на пойменном участке, м;

$Q_{\text{пм}}$ – расход воды на пойменном участке после стеснения потока насыпями подходов, м³/с;

$B_{\text{п}}$ – ширина пойменного участка за вычетом ширины опор, м;

$v_{\text{нер}}$ – неразмывающая скорость, м/с, определяемая по формулам [34]:

- для несвязных грунтов:

$$v_{\text{нер}} = 3,6 \sqrt[4]{H_{\text{пб}} \cdot d}, \quad (1.5)$$

где d – средний диаметр фракции грунта, слагающего дно, м;

- для связных грунтов:

$$v_{\text{нер}} = \frac{0,4}{\varepsilon} \cdot (3,34 + \log H_{\text{пб}}) \cdot \sqrt{0,151 + C_p}, \quad (1.6)$$

где ε – коэффициент снижения неразмывающей скорости; $\varepsilon = 1,4$ при условии, что поток влечет более 0,1 % мелких наносов, иначе $\varepsilon = 1,0$;

C_p – расчетное сцепление грунта, 10⁴ Па.

Средний диаметр частиц d вычисляется по гранулометрическому составу грунта, слагающего дно [34]:

$$d = \sum p_i d_i / 100, \quad (1.7)$$

где d_i – средний диаметр частиц фракций, м, который определяется как среднее арифметическое из максимального и минимального диаметров частиц заданной фракции; p_i – массовая доля фракций, %.

При $d_{85}/d \leq 1,2$ (d_{85} – диаметр частиц грунта, меньше которого в пробе содержится 85 % грунта по массе) грунт считается однородным, тогда к расчету неразмывающей скорости принимается диаметр частиц d , вычисленный по формуле (1.7). Иначе грунт неоднородный, к расчету неразмывающей скорости принимается диаметр частиц $d = d_{85}$.

На русловом участке отверстия моста, на котором размыв является результатом нарушения продольного баланса в движении наносов, прекращение размыва возможно только после восстановления этого баланса. Уравнение баланса наносов имеет вид [2]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{dG}{dl}, \quad (1.8)$$

где $\frac{d\omega}{dt}$ – скорость приращения площади сечения потока с течением времени (скорость размыва);

$\frac{dG}{dl}$ – градиент изменения расхода руслоформирующих наносов по длине потока.

Из уравнения баланса наносов (1.8) следует, что прекращению размыва отвечает скорость размыва, равная нулю, а следовательно, и нулевой градиент расхода наносов вдоль размывающего русла. Поскольку на участок размыва поступает строго определенный суммарный бытовой расход руслоформирующих наносов, то после полного завершения размыва на пике паводка под мостом будет проходить тот же расход наносов. Для определения глубины общего размыва русла под мостом достаточно составить и приравнять два выражения расхода наносов в бытовых условиях G_6 и под мостом после окончания размыва G_M [2]:

$$G_6 = G_M. \quad (1.9)$$

Для определения расхода наносов всех видов используют известные полуэмпирические формулы, при этом формулы различных авторов легко могут

быть приведены к общему виду. Подставляя в формулу (1.9) выражения расходов наносов, средняя глубина потока в русле под мостом после размыва составит [2]:

$$H_{\text{рм}} = H_{\text{рб}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{рм}}}{Q_{\text{рб}}} \right)^{\frac{8}{9}} \cdot \left(\frac{B_{\text{рб}}}{B_{\text{рм}}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.10)$$

где $H_{\text{рб}}$ – средняя бытовая глубина потока в русле, м;

$Q_{\text{рб}}$ – бытовой расход воды в русле, м³/с;

$Q_{\text{рм}}$ – расход воды в русле после стеснения потока насыпями подходов, м³/с;

$B_{\text{рб}}$ – бытовая ширина русла, м;

$B_{\text{рм}}$ – ширина русла за вычетом ширины опор, м.

Тогда глубина общего размыва в русле под мостом определяется по формуле [2]:

$$h_{\text{ро}} = H_{\text{рм}} - H_{\text{рб}} = H_{\text{рб}} \cdot \left[\left(\frac{Q_{\text{рм}}}{Q_{\text{рб}}} \right)^{\frac{8}{9}} \cdot \left(\frac{B_{\text{рб}}}{B_{\text{рм}}} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]. \quad (1.11)$$

Правильность методики определения общего размыва подтверждена опытом эксплуатации мостовых переходов и поэтому может быть применена при оценке расчетных размывов дна.

1.2.2 Методика расчета глубины местного размыва

Глубина местного размыва у опоры зависит от режима наносов. При непрерывном поступлении наносов в воронку размыва происходит быстрое возрастание глубины, затем она несколько спадает и, пульсируя, устанавливается на некотором своем значении, которое называется равновесной глубиной. Пульсирующий характер объясняется неравномерным поступлением наносов, перемещающихся грядами, и периодическим сползанием верхового откоса воронки размыва. При отсутствии поступления наносов в воронку местного размыва (осветленный поток) глубина размыва медленно увеличивается, асимптотически приближаясь к пределу [34].

Мерой подвижности наносов в реках является скорость потока v , сравниваемая с неразмывающей скоростью $v_{\text{нер}}$. Исходя из этого, различают два режима наносов:

- 1 – наносы поступают в воронку местного размыва при $v > v_{\text{нер}}$;
- 2 – осветленный поток при $v \leq v_{\text{нер}}$.

По сравнению с первым режимом глубина размыва во втором случае больше и устанавливается в течение более длительного времени.

На расчет глубины местного размыва, помимо режима наносов, также влияет связность грунта, слагающего дно у опоры моста, и тип фундамента опоры. Поэтому далее расчетные формулы будут приводиться как для связных, так и для несвязных грунтов для фундаментов мелкого заложения и свайных ростверков.

Расчет глубины местного размыва начинается с определения режима наносов. Для этого определяют неразмывающую скорость по формулам [34]:

- для несвязных грунтов:

$$v_{\text{нер}}^{\text{несв}} = 3,6 \sqrt[4]{H \cdot d}, \quad (1.12)$$

где H – глубина потока у опоры после общего размыва, м;

d – средний диаметр фракции грунта, слагающего дно, м, определяемый по формуле (1.7);

- для связных грунтов:

$$v_{\text{нер}}^{\text{св}} = \frac{0,4}{\varepsilon} \cdot (3,34 + \log H) \cdot \sqrt{0,151 + C_p}, \quad (1.13)$$

где ε – коэффициент снижения неразмывающей скорости; $\varepsilon = 1,4$ при условии, что поток влечет более 0,1 % мелких наносов, иначе $\varepsilon = 1,0$;

C_p – расчетное сцепление грунта, 10^4 Па.

Сравнивая полученную неразмывающую для грунта скорость $v_{\text{нер}}$ и фактическую скорость потока у опоры v , определяют режим наносов. Далее для расчета глубины местного размыва определяют взмучивающие среднюю ($v_{\text{в}}$) и донную ($v_{\text{вд}}$) скорости потока у опоры по следующим формулам:

- для несвязных грунтов:

$$v_{\text{В}}^{\text{нecв}} = \sqrt[3]{g\omega H} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{0.06}, \quad (1.14)$$

где g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²;

ω – гидравлическая крупность наносов, м/с, определяемая по [табл. 4.1, 34];

$$v_{\text{Вд}}^{\text{нecв}} = 10,2\sqrt[3]{Hd}, \quad \text{при } d \leq 0,2 \text{ мм} \quad (1.15)$$

$$v_{\text{Вд}}^{\text{нecв}} = \sqrt[3]{g\omega H}, \quad \text{при } d > 0,2 \text{ мм} \quad (1.16)$$

- для связных грунтов:

$$v_{\text{В}}^{\text{CB}} = 2,03 \cdot H^{0,14} \cdot v_{\text{нecв}}^{\text{CB}}, \quad (1.17)$$

$$v_{\text{Вд}}^{\text{CB}} = 1,43 \cdot H^{\frac{1}{12}} \cdot v_{\text{нecв}}^{\text{CB}}. \quad (1.18)$$

Расчет глубины местного размыва у опоры на свайном фундаменте (рисунок 1.6) производится по формулам:

- для режима поступления наносов в воронку размыва ($v > v_0$):

$$h_{\text{м}} = 1,1\sqrt{H} \left(\frac{v}{v_{\text{В}}}\right)^n \left\{ \sqrt{b_1} K_{\phi 1} \left[\left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} - \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right] + \sqrt{b_2} K_{\phi 2} \left[1 - \left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} \right] + K_{\phi a} \frac{A_N a}{\sqrt{S+a}} \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right\}, \quad (1.19)$$

- для осветленного потока ($v \leq v_0$):

$$h_{\text{м}} = 1,1H^{0,4} \left(\frac{v}{v_{\text{В}}}\right)^n \left\{ b_1^{0,6} K_{\phi 1} \left[\left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} - \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right] + b_2^{0,6} K_{\phi 2} \left[1 - \left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} \right] + a^{0,6} K_{\phi a} A_N \sqrt{\frac{a}{S+a}} \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right\}, \quad (1.20)$$

где n – степенной параметр, определяемый по формуле:

$$n = 0,50 + 0,24 \frac{v}{v_{\text{Вд}}}, \quad (1.21)$$

b_1 – ширина ростверка, м;

$K_{\phi 1}$ – коэффициент формы ростверка, определяемый по [34];

e_1 – расстояние от дна до низа ростверка, м;

e_2 – расстояние от дна до верха ростверка, м;

b_2 – ширина тела опоры, м;

$K_{\phi 2}$ – коэффициент формы тела опоры, определяемый по [34];

a – диаметр сваи, м;

S – среднее расстояние между сваями в свету, м;

$K_{\phi a}$ – коэффициент формы сваи, принимаемый равным 1,0 для цилиндрической сваи и 1,46 для призматической;

A_N – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа свай N в ряду поперек моста, равный $N^{2/3}$.

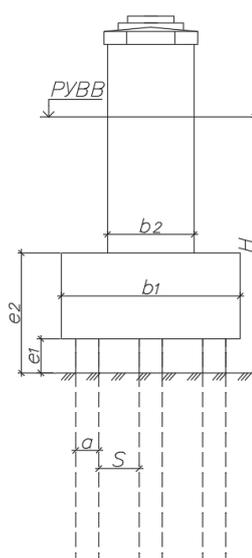


Рисунок 1.6 – Схема для расчета глубины местного размыва грунта у опоры на свайном фундаменте

Расчет глубины местного размыва грунта у опоры на фундаменте мелкого заложения приведен для трёх наиболее характерных схем опоры (рисунок 1.7): одноступенчатой, двухступенчатой и трехступенчатой, и производится по следующим формулам.

Для одноступенчатой опоры:

- для режима поступления наносов в воронку размыва ($v > v_0$):

$$h_m = 1,1\sqrt{bH} \cdot \left(\frac{v}{v_B}\right)^n \cdot K_{\phi} \cdot K_{\alpha}, \quad (1.22)$$

- для осветленного потока ($v \leq v_0$):

$$h_m = 1,1 \cdot b^{0.6} \cdot H^{0.4} \left(\frac{v}{v_B}\right)^n \cdot K_{\phi} \cdot K_{\alpha}, \quad (1.23)$$

где b – ширина опоры, м;

K_ϕ – коэффициент формы опоры, определяемый по [34];

K_α – коэффициент косины потока, вычисляемый по формуле:

$$K_\alpha = 1 + \left[1,22 - \frac{1,12}{\sqrt{\left(\frac{H}{b} + 0,75\right)^3}} \right] \cdot f, \quad (1.24)$$

где f – коэффициент, определяемый по [34] в зависимости от угла набега потока α и отношения длины опоры к ширине.

Для двухступенчатой опоры:

- для режима поступления наносов в воронку размыва ($v > v_0$):

$$h_m = 1,1\sqrt{H} \cdot \left(\frac{v}{v_b}\right)^n \cdot \left\{ \sqrt{b_1} \cdot K_{\phi 1} \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25} + \sqrt{b_2} \cdot K_{\phi 2} \cdot \left[1 - \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25}\right] \right\} \cdot K_\alpha \quad (1.25)$$

- для осветленного потока ($v \leq v_0$):

$$h_m = 1,1 \cdot H^{0,4} \cdot \left(\frac{v}{v_b}\right)^n \left\{ b_1^{0,6} \cdot K_{\phi 1} \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25} + b_2^{0,6} \cdot K_{\phi 2} \cdot \left[1 - \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25}\right] \right\} \cdot K_\alpha \quad (1.26)$$

где b_1 – ширина нижнего яруса опоры, м;

$K_{\phi 1}$ – коэффициент формы нижнего яруса опоры, определяемый по [34];

e – расстояние от дна (после общего размыва) до верха нижнего яруса, м;

b_2 – ширина верхнего яруса опоры, м;

$K_{\phi 2}$ – коэффициент формы верхнего яруса опоры, определяемый по [34].

Для трехступенчатой опоры:

- для режима поступления наносов в воронку размыва ($v > v_0$):

$$h_m = 1,1\sqrt{H} \cdot \left(\frac{v}{v_b}\right)^n \cdot \left\{ \sqrt{b_1} \cdot K_{\phi 1} \cdot \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} + \sqrt{b_2} \cdot K_{\phi 2} \cdot \left[\left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} - \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right] + \sqrt{b_3} \cdot K_{\phi 3} \cdot \left[1 - \left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25}\right] \right\}, \quad (1.27)$$

- для осветленного потока ($v \leq v_0$):

$$h_M = 1,1 \cdot H^{0,4} \cdot \left(\frac{v}{v_B}\right)^n \cdot \left\{ b_1^{0,6} \cdot K_{\phi 1} \cdot \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} + b_2^{0,6} \cdot K_{\phi 2} \cdot \left[\left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} - \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25} \right] + b_3^{0,6} \cdot K_{\phi 3} \cdot \left[1 - \left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25} \right] \right\}, \quad (1.28)$$

где b_1 – ширина нижнего яруса опоры, м;

$K_{\phi 1}$ – коэффициент формы нижнего яруса опоры, определяемый по [34];

e_1 – расстояние от дна (после общего размыва) до верха нижнего яруса, м;

b_2 – ширина среднего яруса опоры, м;

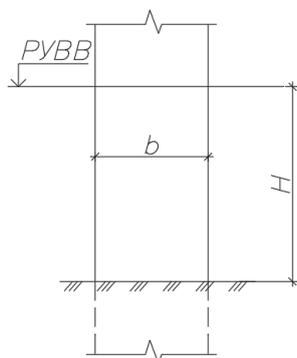
$K_{\phi 2}$ – коэффициент формы среднего яруса опоры, определяемый по [34];

e_2 – расстояние от дна (после общего размыва) до верха среднего яруса, м;

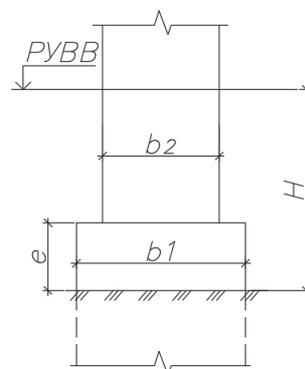
b_3 – ширина верхнего яруса опоры, м;

$K_{\phi 3}$ – коэффициент формы верхнего яруса опоры, определяемый по [34].

а) одноступенчатая опора



б) двухступенчатая опора



в) трехступенчатая опора

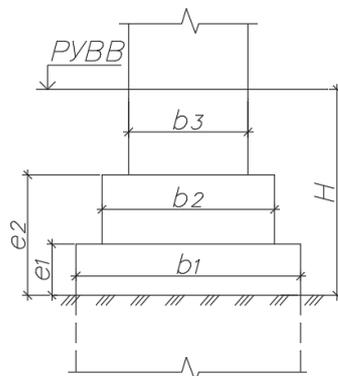


Рисунок 1.7 – Схема для расчета глубины местного размыва грунта у опоры на фундаменте мелкого заложения

Как видно из приведенных выше расчетов, на глубину размыва влияют множество факторов, такие как форма тела опоры, её геометрические размеры, параметры потока (скорость, расход и уровень воды, угол набега потока на опору), тип фундамента и тип грунтов основания фундамента. Все эти параметры необходимо учитывать при проектировании, эксплуатации и ремонте опор.

Одного лишь расчета максимальной глубины размыва грунта у опоры и последующего определения необходимого заглубления подошвы фундамента опоры в грунт может оказаться недостаточно для безопасной эксплуатации мостового перехода [3, 46, 92]. Это связано в первую очередь с тем, что расчетные характеристики потока, такие как уровень высокой воды и соответствующие ему скорость и расход, за период эксплуатации сооружения могут существенно измениться по сравнению со значениями, принятыми при проектировании мостового перехода. Эти изменения могут быть связаны с изменениями климата [30], а также с изначально заложённым расчетом возможной вероятностью превышения характеристик потока. Примером последствий повышения уровня воды после продолжительных дождей может служить авария на Каштакском мосту в г. Чита в 2018 году. В связи с значительно увеличившимся расходом воды произошел существенный рост скорости течения реки, что привело к размыву грунта у одной из русловых опор и, как следствие, к крену опоры. Нарастание деформаций опоры произошло довольно быстро, что в конечном итоге привело к обрушению опоры и двух опирающихся на нее пролетных строений (рисунок 1.8).

Помимо этого, в практике встречаются случаи, когда у опоры происходит размыв скального основания, изначально считающегося неразмываемым. Это обусловлено особенностью конкретного скального грунта, который при нарушении своей природной структуры (сооружении фундамента опор) разрушается до грунта, подверженного размывам. Исходя из этого, для обеспечения надежности мостового сооружения необходим периодический, а в некоторых критических случаях (рисунок 1.8) и постоянный мониторинг глубин размывов грунта у опор моста.

а) 11 июля 2018 г.



б) 12 июля 2018 г.



в) 13 июля 2018 г.



г) 15 июля 2018 г.



Рисунок 1.8 – Нарастание крена опоры и обрушение вследствие размыва [122]

1.3 Существующие способы обнаружения размывов грунта у опор мостов

1.3.1 Отечественный опыт мониторинга размывов

Согласно Инструкции по гидрологическому мониторингу [38], на железнодорожных мостах сети ОАО «РЖД» размывы грунта выявляют путем измерения профилей русла и измерений глубин в зоне местных размывов. Также обнаружение размывов возможно по результатам комплексного подводно-технического обследования опор мостов [40].

Измерения профилей русла должны выполняться на всех мостах длиной более 100 м, а также на мостах меньшей длины, где это требуется по состоянию опор, русла реки, регуляционных сооружений или по характеру паводков. Глубины должны измеряться не менее двух раз в год: перед паводком и сразу же после прохождения пика паводка. При выявлении опасных (угрожающих надежной работе моста) размывов промеры глубин выполняют ежедневно или несколько раз в сутки. Измерения глубин выполняют, как правило, в трех створах: в главном створе, проходящем в непосредственной близости к верховым граням опор (на расстоянии не более 0,5 м от верховых граней опор в зависимости от конструкции фундаментов) и в створах на расстоянии 25 м выше и ниже моста. При интенсивных размывах русла промеры делают в большем числе створов, а при устойчивом русле - только в створе у верховых граней опор. Измерения глубин проводят по закрепленным на местности створам эхолотами и гидролокаторами кругового обзора или традиционными средствами, к которым относят рейки, наметки, гидрометрические штанги, ручные и механические лоты и т.д. [41, 45, 47, 48].

Рейка (водомерная или нивелировочная) применяется для промеров глубин малых рек глубиной до 2 м. Рейку устанавливают вертикально на дно реки и по ее делениям отсчитывают значение, соответствующее глубине реки в данной точке.

Наметка представляет собой деревянный шест круглого сечения. Нижний конец наметки снабжают стальным башмаком, который придает ей устойчивость и предохраняет от разрушения при ударах о грунт. В слабых илистых грунтах во

избежание излишнего заглубления, а, следовательно, предупреждения получения неточных данных на нижний конец наметки устанавливается диск. Точность отсчета по наметке в зависимости от скорости течения, волнения и характера грунта дна лежит в пределах 2-5 см. Применение наметки ограничивается глубиной воды в 3-4 м. Для применения при значительной скорости течения воды непосредственно с движущегося плавсредства применяется плавучая наметка, снабженная грузом для удержания её в вертикальном положении. В тех же условиях, что и наметки, применяются гидрометрические штанги. Основной отличительной особенностью штанги является стальное или алюминиевое исполнение, что позволяет изготавливать её сборной для регулировки длины.

Ручной или механический лот представляет собой металлический груз различной формы (цилиндрической, конической, пирамидальной и рыбовидной), подвешиваемый на пеньковой бечеве, капроновом шнуре или мягком стальном тросе. Ручной лот весом до 10 кг опускают непосредственно с рук, механический (до 100 кг) – с помощью лебедки со счетчиком. Стандартный промерный лот применяется при измерении глубин в реках до 25 м. Точность отсчета вследствие изгиба троса меньше, чем при измерении наметкой, и составляет 5-10 см.

Измерения глубин в зоне местных размывов выполняются по тому же регламенту, что и измерения профилей русла. Измерения глубин у мостовых опор, подвергающихся местным размывам, производят по периметру этих сооружений и дополнительным лучевым створами, направленным по нормальям к контурам опоры. Расстояние между промерными вертикалями по длине луча составляет обычно 2 - 4 м; первый промер делают вплотную к фундаменту опоры или шпунтовому ограждению при его наличии.

Измерения глубин проводят только для больших и внеклассных мостов, но, как показывает практика, опасные размывы могут развиваться и на средних, и на малых мостах. Согласно требованиям инструкции [38], на малых и средних мостах измерения глубин проводят только при необходимости, выявление которой возможно по результатам комплексного подводно-технического обследования специализированной водолазной станцией. Периодичность обследования

подводной части опор водоплавающей станцией регламентирована инструкцией по содержанию искусственных сооружений [40] и составляет один раз в 10 лет, а также после ремонта подводной части опор. За 10 лет может образоваться размыв с глубиной, критичной для безопасной эксплуатации моста.

Главными недостатками описанных способов измерений глубин является большая трудоемкость работ и невозможность проведения работ в паводок. Анализируя методы расчета глубины размыва (см. п. 1.2), можно сделать вывод, что именно паводок является самым опасным периодом для развития размыва, так как глубина размыва напрямую зависит от уровня воды и скорости течения. Исходя из этого, необходимо совершенствование способов обнаружения размывов грунта у опор мостов на сети ОАО «РЖД».

Всё чаще для оценки технического состояния сооружений применяют методы, основанные на анализе характеристик колебаний элементов конструкций. Например, работы Т.М. Баранова [5-7] посвящены анализу вибрационных параметров конструкций, в том числе и арочных пролетных строений. Метод вибродиагностики, основанный на анализе собственных частот колебаний и демпфирующих свойств, разработанный И.С. Бондарем [16, 17], применяют для оценки технического состояния балочных пролетных строений железнодорожных мостов. Особое внимание в работах Смирнова В.Н. [90, 91] уделяется изучению динамической работы мостов на высокоскоростных магистралях. Большое количество исследований в области динамического мониторинга проведено под руководством А.Н. Яшнова [106, 106-112]. Помимо этого, динамические параметры конструкций мостовых сооружений изучаются другими российскими учёными: В.С. Афанасьевым [4], А.А. Белым [9, 10, 11, 12, 63, 64], Н.Г. Бондарем [18], Дьяченко Л.К. [33, 58], И.И. Казеем [42], В.В. Кондратовым [49, 50], Ю.В. Новаком [66], И. Г. Овчинниковым [68], В.Ю. Поляковым [79, 80, 135], В.С. Сафроновым [44, 87, 126, 141] и др. [3, 13, 21, 22, 27-32, 36, 37, 43, 54, 56, 57, 71, 59-61, 94-102]. В промышленно-гражданском строительстве методам вибродиагностики уделяют внимание Савин С.Н. [85, 86], Суцев С.П. [98], Улыбин А.В. [8, 99] и др. [51, 62, 69]. Для установки степени повреждения жилых зданий,

оценки рисков обрушения строений МЧС России использует мобильный диагностический комплекс «Стрела-П», разработанный ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» (ЦИЭКС). Комплекс «Стрела-П» основан на динамическом анализе устойчивости зданий и сооружений и предназначен для оперативного неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния несущих конструкций эксплуатируемых, строящихся и реконструируемых зданий и сооружений [65]. Методы вибродиагностики также используются в области эксплуатации машин и механизмов для контроля технического состояния оборудования [35].

Анализ отечественного опыта мониторинга технического состояния мостовых конструкций показал, что исследования возможности применения методов вибродиагностики для обнаружения и контроля размывов грунта у опор отсутствуют. По мере развития глубины размыва постепенно увеличивается свободная длина опоры, тогда как конструктивная целостность (масса опоры) остается неизменной. Этот факт позволил выдвинуть гипотезу о зависимости частоты собственных колебаний природно-техногенной системы, состоящей из опоры, грунта основания и опирающихся на опору пролетных строений, от величины размыва грунта у опоры. При этом следует отметить, что наиболее распространенные дефекты самой опоры (выщелачивание, расстройство расшивки швов между контурными блоками, деградиационное разрушение бетона различной степени развития и пр.) не оказывают значительного влияния на частоту собственных колебаний. Это обусловлено тем, что указанные дефекты не приводят к значительному изменению жесткости или массы конструкции.

1.3.2 Зарубежный опыт мониторинга размывов

В зарубежных странах, помимо традиционных способов обнаружения размывов грунта у опор мостов (промеров глубин), ведутся исследования других возможных методов мониторинга [113, 116, 119, 120, 124, 138, 139, 140], анализ которых отражен в статье автора [23]. Большое количество лабораторных, полевых

и численных исследований посвящено влиянию размывов грунта у опор на спектр собственных частот колебаний моста и его элементов [114, 115, 117, 118, 121, 123, 125-133, 136-137, 142, 143]. Например, в работе [132] колебания, вызванные пропуском по мосту подвижного состава, оценивались показателем β , равным отношению амплитуды горизонтального ускорения колебаний к амплитуде вертикального ускорения. Датчики ускорений были установлены на насадках опор. По результатам полевых испытаний для опор с размывом и без размыва было выявлено, что значение β увеличивается с развитием размыва в связи с возрастанием амплитуд горизонтальных колебаний. Также в этой работе оценивались колебания опоры, вызываемые течением в паводок. Фиксация ускорений колебаний также проводилась с помощью датчиков-акселерометров. По результатам обработки записанных данных с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) была получена частота собственных колебаний, которая изменялась при наличии размыва.

В лабораторных исследованиях влияния размыва на динамические параметры конструкции J. L. Briaud и др. [118] использовали две модели моста в гидравлическом лотке (на фундаментах мелкого и глубокого заложения). Исследование заключалось в контролируемом увеличении скорости воды в лотке для постепенного развития размыва грунта у опор. Выведение конструкции из состояния равновесия осуществлялось посредством ударов резиновым молотком по различным заранее определенным точкам на проезжей части модели моста, имитирующих прохождение транспортных средств. Возбуждаемые ускорения в трех направлениях (вертикальном, в направлении движения транспорта и направлении потока воды) фиксировались датчиками-акселерометрами, установленными на опоре модели моста. Анализ влияния размывов осуществлялся двумя способами. Во-первых, по спектрам частот, получаемых с помощью БПФ измеренных ускорений. Во-вторых, в качестве параметра для оценки размыва было предложено использовать отношения среднеквадратичных значений ускорений, измеренных в двух направлениях (всего три комбинации направлений).

Анализировались первые три тона колебаний. Для ускорений в направлениях потока воды и движения транспорта:

$$\frac{a_x}{a_y} = \frac{\sqrt{\frac{a_{x1}^2 + a_{x2}^2 + \dots + a_{xn}^2}{n}}}{\sqrt{\frac{a_{y1}^2 + a_{y2}^2 + \dots + a_{yn}^2}{n}}}, \quad (1.29)$$

где a_x – среднее квадратичное значение измеренного ускорения в направлении потока воды;

a_y – среднее квадратичное значение измеренного ускорения в направлении движения транспорта;

$n = 1 \dots 3$ – порядковый номер тона колебаний.

По результатам экспериментов частота собственных колебаний по направлению течения воды (поперек оси моста) оказалась наиболее чувствительной к появлению размыва как на фундаменте мелкого заложения, так и глубокого. На рисунке 1.10 представлены результаты исследований на фундаменте мелкого заложения, из которых видно снижение частот первой, второй и третьей мод колебаний во времени с увеличением глубины размыва. Следует отметить, что первая форма колебаний оказалась менее чувствительна к размыву по сравнению с двумя другими. В то же время соотношения средних квадратичных значений ускорений по двум комбинациям направлений также показывают значительные изменения при появлении размыва грунта у опоры (рисунок 1.11). Аналогичные результаты были получены и на фундаменте глубокого заложения.

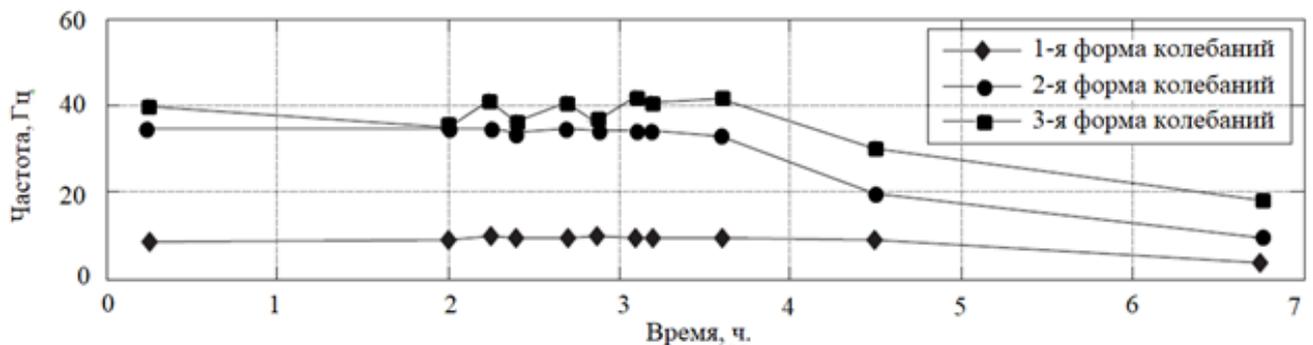


Рисунок 1.10 – График изменения частот колебаний в направлении потока для опоры на фундаменте мелкого заложения [118]

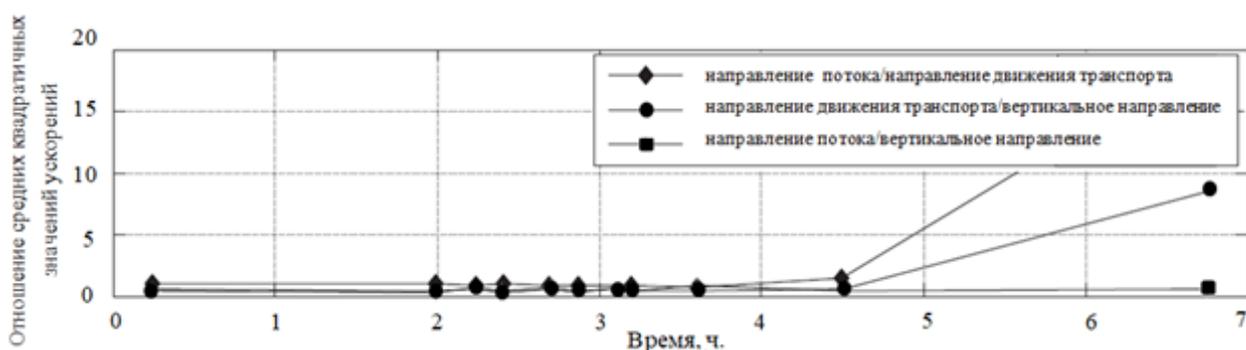


Рисунок 1.11 – График изменения соотношений средних квадратичных значений ускорений для трех комбинаций направлений для опоры на фундаменте мелкого заложения [118]

С. Yao и др. [142] провели экспериментальные исследования изменения частоты собственных колебаний модели опоры на фундаменте мелкого заложения. Модель представляла собой бетонную колонну диаметром 0,45 м и высотой 4 м, заглубленную в лотке в песчаный грунт. Пролетные строения имитировали специальным настилом, уложенным поверх опоры. Непосредственно для определения частоты собственных колебаний использовали датчик-акселерометр, установленный на вершине колонны. Когда лоток не был заполнен водой, модель выводили из равновесия при помощи ударов молотком по настилу. После подачи в лоток воды в качестве возбуждающей колебания силы использовали сам поток воды, которому придавали различную скорость. По мере увеличения скорости потока происходило увеличение глубины воронки размыва. По результатам проведенных экспериментов анализировали первые три частоты собственных колебаний по направлению потока (направлению, предпочтительному для местного размыва), которые, как показано на рисунке 1.12, уменьшались при увеличении глубины воронки размыва. Следует отметить, что, согласно результатам эксперимента, первая частота колебаний оказалась менее чувствительна к размыву, по сравнению со второй и третьей частотами.

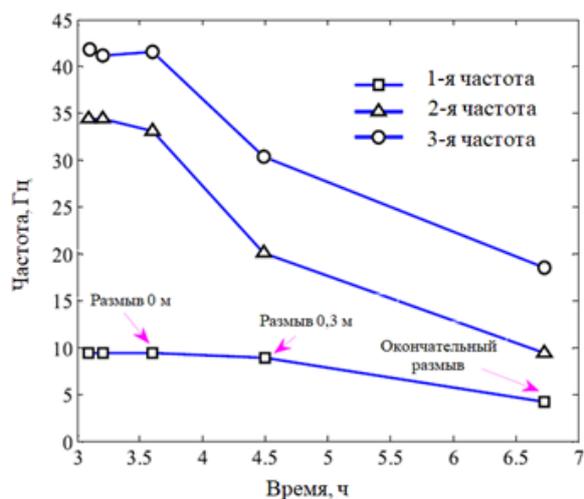


Рисунок 1.12 – Изменение частоты собственных колебаний по направлению потока [142]

В работе [127] У. Ко и др. провели исследования влияния размывов на динамические характеристики опор мостов в полевых условиях. В ходе работ рассматривались опоры с размывами от 0,5 до 7,0 м. Конструкции выводились из состояния равновесия проезжающими по мосту автомобилями. Регистрация ускорений производилась датчиками-акселерометрами, устанавливаемыми на пролетном строении или проезжей части. В ходе измерений были получены собственные частоты колебаний путем осреднения значений частот БПФ по трем участкам записи, извлеченным из общего сигнала. Результаты исследований показали, что собственная частота колебаний по направлению движения транспортных средств вследствие размыва изменяется незначительно ввиду ограничений со стороны пролетных строений. Тогда как частота колебаний по направлению потока существенно снижается с увеличением глубины воронки размыва, что связано с уменьшением общей жесткости опоры в направлении потока. Данный факт также был подтвержден лабораторными исследованиями J. L. Briaud и др. [117].

Также авторами [130] было выявлено, что место установки датчика на опоре не влияет на качество получаемых данных. Так, по трем датчикам, установленным в верхней, средней и нижней частях опоры, наблюдается четкое снижение собственной частоты колебаний для опоры с размывом около 4 м по сравнению с опорой без размыва.

Влиянию уровня воды на динамические параметры опоры посвящены несколько работ. Например, Т. К. Lin и др. [131] в своих экспериментах получили собственные частоты колебаний одной и той же опоры при моделировании различных комбинаций уровня воды и глубины заделки опоры в грунт. Результаты исследований показали, что собственная частота колебаний опоры при различном уровне воды меняется незначительно по сравнению с оказываемым существенным влиянием от глубины заделки опоры в грунт. В работе же [136], исследуя в качестве опор три колонны разной геометрии, было установлено, что влияние уровня воды на собственную частоту колебаний зависит от жесткости опоры. Так, для опоры с высокой жесткостью, расположенной в воде, собственная частота колебаний очень близка к частоте опоры «на суше». Тогда как разница подобных частот колебаний для гибкой опоры более существенна.

Авторами также проводятся численные исследования влияния различного модуля упругости грунта на динамические параметры опоры. В работе [123] представлен анализ изменений собственной частоты колебаний опоры, моделируемой в шести типах грунтового основания разной прочности, при увеличении глубины воронки размыва. Для четырех типов грунтового основания модуль упругости принят увеличивающимся по мере увеличения глубины заложения, для одного – уменьшающимся, и для последнего – постоянным. По результатам исследований, представленным на рисунке 1.13а, во всех шести случаях наблюдается уменьшение частоты колебаний опоры при моделировании увеличения глубины размыва. Также из полученных графиков видно, что значения собственных частот колебаний при различных значениях модулей упругости грунта практически идентичны, что говорит о том, что модуль упругости грунта существенно не влияет на частоту колебаний опоры.

В другой работе [115] расчетные исследования изменений частот колебаний проводились при различных модулях упругости грунта, но уже постоянного значения по глубине заложения фундамента. Конечно-элементный расчет показал, что на значение собственной частоты колебаний опоры модуль упругости оказывает существенное влияние только при его значительном снижении. Как

видно из рисунка 1.13б, значения частот при модулях упругости от $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$ кН/м² имеют близкие значения, а существенные отличия возникают при снижении модуля упругости до 10^5 кН/м².

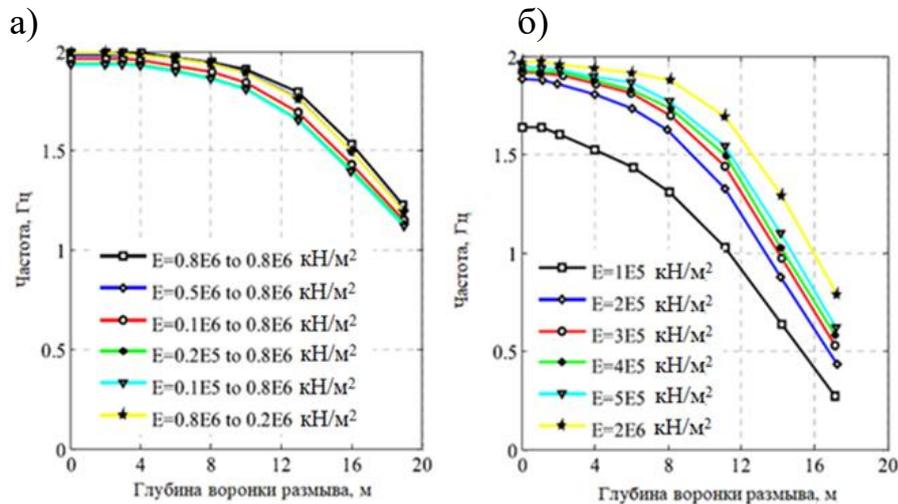


Рисунок 1.13 – График зависимости собственной частоты колебаний опоры от глубины размыва при разном модуле упругости грунта по [123] (а) и по [115] (б)

Основным недостатком зарубежных исследований является их несистемность, каждая работа посвящена узкому либо лабораторному, либо численному исследованию влияния отдельных параметров. Ввиду этого, результаты проводимых исследований не нашли применения в качестве единого способа мониторинга для природных объектов.

Цели и задачи исследования

Размыв грунта у опор мостового сооружения сверх расчетной величины является опасным повреждением. Основной причиной аварийных ситуаций вследствие размыва грунта у опор является изменение характеристик водного потока в процессе эксплуатации сооружения, что невозможно учесть при проектировании. Заглубление подошвы фундамента опоры в грунт может оказаться недостаточным для безопасной эксплуатации моста и привести к крену опоры и обрушению пролетных строений.

Отечественный опыт и инструментарий мониторинга размывов грунта у опор мостов по сравнению с зарубежным довольно скуден и заключается в прямых измерениях глубин и визуальном осмотре. Методы непосредственного измерения

глубин обладают существенными недостатками, затрудняющими своевременную оценку величины размыва из-за своей ограниченности применения в паводки, редкой периодичности для средних и малых мостов, а также большой трудоемкости работ. За рубежом помимо вышеуказанных способов мониторинга ведут исследования возможности использовать анализ ускорений и спектров частот собственных колебаний конструкций для оценки размывов. Но все эти исследования ведутся не системно, каждая работа посвящена узкому либо лабораторному, либо численному исследованию влияния отдельных параметров. Ввиду этого, результаты проводимых исследований не нашли применения в качестве единого способа мониторинга для натуральных объектов. В результате анализа установлено, что апробированные на практике расчетные модели для вычисления собственных частот колебаний опоры с учетом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом, окружающим фундамент, отсутствуют.

Таким образом, **целью** работы является совершенствование способа мониторинга размывов грунта у опор железнодорожных мостов за счёт контроля частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- проведение натуральных измерений частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на них пролетных строений, при различном конструктивном исполнении элементов и фактическом уровне грунта у опор;
- обоснование расчетных допущений при определении частоты собственных колебаний опоры с учётом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом основания;
- разработка алгоритма мониторинга глубины размыва грунта у опор по частотам собственных колебаний.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПОР ¹

2.1 Программа проведения экспериментальных исследований

Основная цель проведения экспериментов заключается в установлении динамических характеристик (частот собственных колебаний) опор железнодорожных мостов различного конструктивного исполнения с учетом фактических глубин заложения фундаментов и величин размывов.

Программа проведения экспериментальных исследований включала следующие этапы:

1) подготовительная часть.

а) *Планирование эксперимента.* На подготовительном этапе с применением автоматизированной базы данных железнодорожных мостов выполнен анализ конструктивного исполнения природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений. Для анализа выбраны семь параметров, характеризующих природно-техногенную систему:

- тип опирающихся на опору пролетных строений;
- тип опорных частей на опоре;
- конструкция тела опоры;
- конструкция фундамента;
- высота опоры, измеряемая от уровня грунта;
- глубина заложения фундамента;
- класс грунта основания.

¹ - В качестве частот собственных колебаний опор подразумеваются частоты природно-техногенных систем, состоящих из самих опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений.

По типу опирающихся на опору пролетных строений выделены следующие группы:

- балочные сплошностенчатые и ребристые разрезные;
- балочные сплошностенчатые и ребристые неразрезные;
- сквозные решетчатые разрезные;
- сквозные решетчатые неразрезные;
- арочные;
- другие.

Диаграмма распределения природно-техногенных систем по типу опирающихся на опору пролетных строений приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Диаграмма распределения природно-техногенных систем по типу опирающихся на опору пролетных строений

Всего проанализировано 7261 пролетное строение, опирающееся на русловые опоры железнодорожных мостов. Преобладающее количество имеют балочные разрезные и ферменные разрезные пролетные строения, составляющие 90,96 % от общего числа конструкций. Помимо этого, в небольшом количестве встречаются неразрезные и арочные пролетные строения, а также другие конструкции, к которым были отнесены балки с откидными консолями и прогоны.

По типу опорных частей на опоре выделены следующие конструкции:

- тангенциальные;

- балансирные;
- катковые;
- секторные;
- валковые.

Диаграмма распределения природно-техногенных систем по типу опорных частей на опорах представлена на рисунке 2.2.

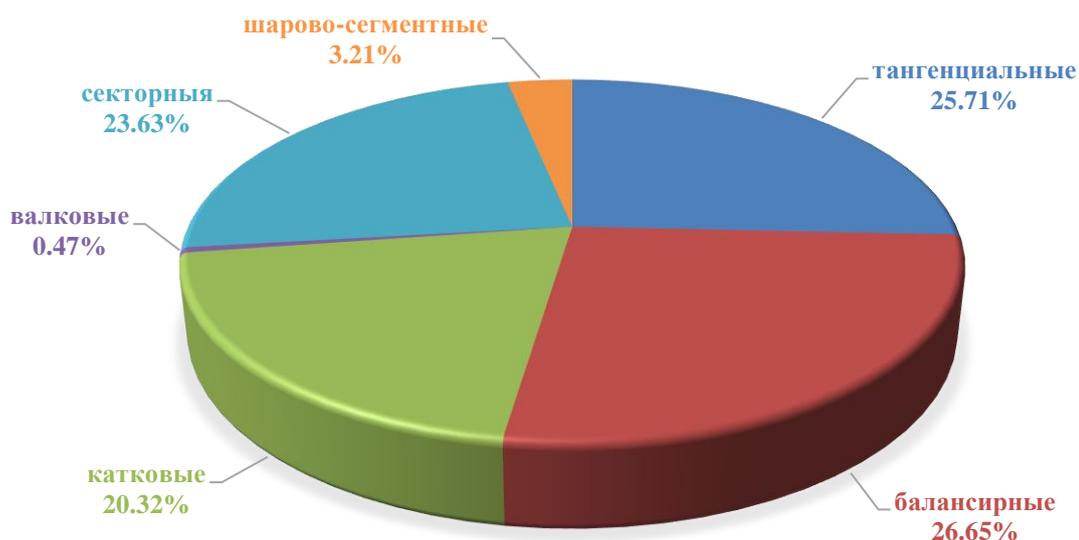


Рисунок 2.2 – Диаграмма распределения природно-техногенных систем по типу опорных частей на опорах

Преобладающим типом опорных частей являются балансирные неподвижные и секторные подвижные опорные части. При этом также довольно распространенными являются катковые подвижные и тангенциальные опорные части. Шарово-сегментные опорные части распространены всего в 3,22% случаев. Это объясняется тем, что они являются новой конструкцией и начали применяться только на вновь проектируемых и реконструируемых мостах.

Тело промежуточных опор железнодорожных мостов можно разделить на семь видов конструкций:

- массивная монолитная;
- массивная сборно-монолитная;
- стоечная;
- свайная;

- столбчатая

- рамная.

Диаграмма распределения природно-техногенных систем по конструкции тела опор приведена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Диаграмма распределения природно-техногенных систем по конструкции тела опор

Из 4788 промежуточных опор наиболее распространенной конструкцией тела опоры является монолитная конструкция, которая представлена 3759 опорами. Также встречаются хоть и в небольшом количестве сборно-монолитные опоры. На остальные конструкции тела опор суммарно приходится 13,48 % опор.

Фундаменты промежуточных опор по конструктивному исполнению с учетом технологии сооружения подразделяются на следующие группы:

- массивный мелкого заложения;
- массивный глубокого заложения (в открытом котловане);
- массивный глубокого заложения (опускной колодец);
- массивный глубокого заложения (кессон);
- низкий свайный ростверк;
- высокий свайный ростверк;
- столбчатый безростверковый;
- свайный безростверковый;

- лежневый.

Диаграмма распределения природно-техногенных систем по конструкции фундамента опор приведена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Диаграмма распределения природно-техногенных систем по конструкции фундамента опор

Согласно диаграмме, 54,72 % промежуточных опор на железнодорожных мостах устроены на массивных фундаментах, к которым также относятся кессоны и опускные колодцы. Опоры на высоком и низком свайных ростверках составляют 38,57 % от общего числа. При этом небольшое количество опор имеют безростверковый фундамент, а для 21 опоры данные о конструкции фундамента отсутствуют.

Диаграммы распределения природно-техногенных систем в зависимости от высоты опор и глубины заложения фундаментов представлены на рисунке 2.5.

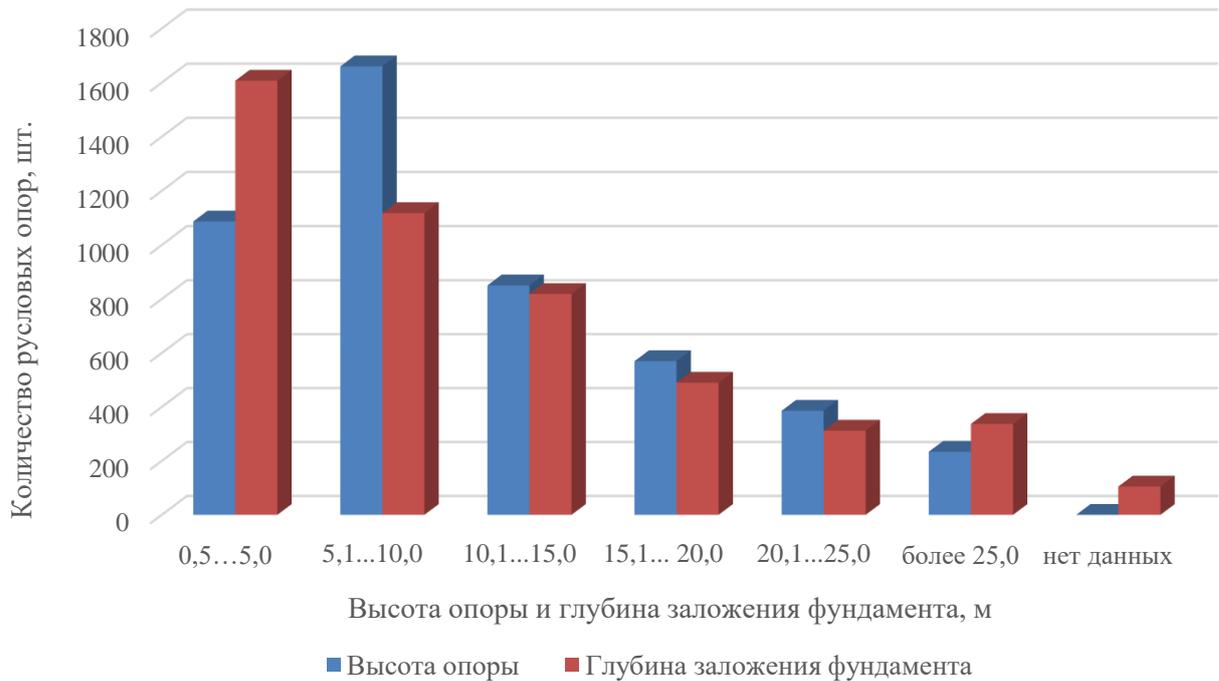


Рисунок 2.5 - Диаграммы распределения природно-техногенных систем по высоте опор и глубине заложения фундаментов

Как видно из диаграмм, высота опор и глубина заложения фундаментов имеют большую вариацию, при этом большинство опор имеет высоту и глубину заложения фундамента до 15,0 м.

По классу грунта основания фундаментов (с учетом подклассов) согласно [28] опоры разделены на четыре большие группы:

- скальный;
- дисперсный несвязный;
- дисперсный связный;
- техногенный.

Диаграммы распределения природно-техногенных систем в зависимости от класса грунта основания по представлены на рисунке 2.6.

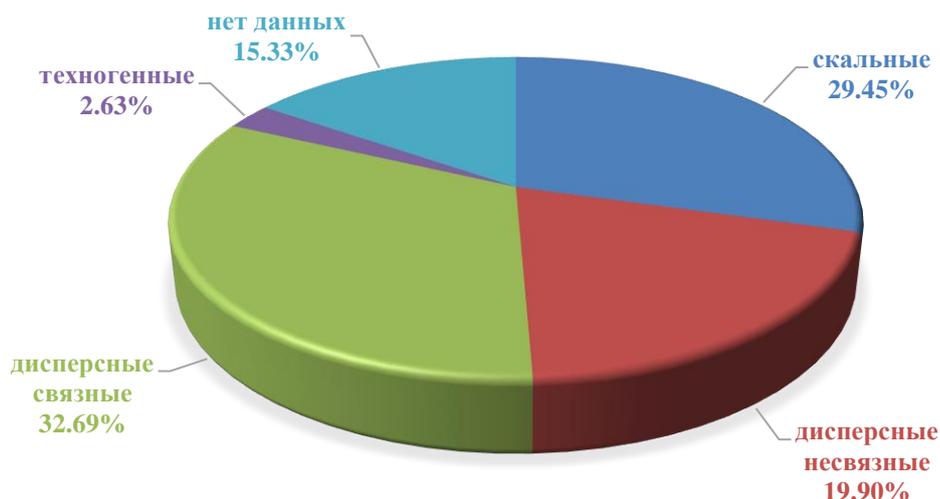


Рисунок 2.6 - Диаграмма распределения природно-техногенных систем по классу грунта основания

Класс грунта основания практически равномерно распределен между скальными, дисперсными связными и несвязными грунтами. При этом для 15,33 % опор данные о грунтах в основании фундаментов отсутствуют.

Из 4788 шт. проанализированных промежуточных опор около четверти (1200 шт.) являются русловыми опорами, подверженными размывам. На основании проведенного анализа конструктивного исполнения природно-техногенных систем с русловыми опорами были выявлены наиболее распространенные параметры конструкций, изменяемость которых необходимо обеспечить в процессе проведения экспериментальных исследований. В ходе экспериментов была обеспечена изменяемость следующих параметров, представленных в таблице 2.1:

- тип опирающихся на опору пролетных строений: сплошнотенчатые балочные разрезные и сквозные решетчатые разрезные;

- тип опорных частей на опоре: балансирные неподвижные, секторные подвижные, катковые подвижные, тангенциальные подвижные и неподвижные, шарово-сегментные подвижные и неподвижные;

- конструкция тела опоры: массивная монолитная и массивная сборно-монолитная;

- высота тела опоры: от 5,0 до 25,0 м;

- конструкция фундамента опоры: свайный ростверк и массивный;

- глубина заложения фундамента: от 2,0 до 30,0 м;
- класс грунта основания (с учетом подклассов) в соответствии с [28]: скальный, дисперсный связный и несвязный.

Таблица 2.1 – Параметры, изменяемые в процессе проведения экспериментальных исследований

Параметр	Значение параметра			
	1	2	3	4
Тип опирающихся на опору пролетных строений	сквозные решетчатые разрезные	сплошностенчатые балочные разрезные	-	-
Тип опорных частей на опоре	катковые подвижные + балансирные неподвижные	секторные подвижные + балансирные неподвижные	шарово- сегментные подвижные и неподвижные	тангенциальные подвижные и неподвижные
Конструкция тела опоры	массивная монолитная	массивная сборно- монолитная	-	-
Высота опоры, измеряемая от уровня грунта	от 5,0 до 25,0 м			
Конструкция фундамента	свайный ростверк	массивный	-	-
Глубина заложения фундамента	от 2,0 до 30,0 м			
Класс грунта основания	дисперсный несвязный	дисперсный связный	скальный	-

б) *Подбор измерительного оборудования.* Поскольку отклонение положения верха опоры при колебаниях от обращающейся по мосту нагрузки заведомо низкое, то для фиксации ускорений этих колебаний были использованы чувствительные вибродатчики-акселерометры. Для обеспечения изменяемости параметров, указанных в таблице 2.1 было необходимо проведение измерений для большого количества опор, поэтому измерения выполнялись с помощью съемных вибродатчиков-акселерометров мобильного малогабаритного измерительного комплекса «Тензор МС», разработанного в Сибирском научно-исследовательском

институте мостов Сибирского государственного университета путей сообщения [14]. Измерительный комплекс «Тензор МС» внесен в реестр средств измерения Российской Федерации (Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.34.007.A № 32603/1 и RU.C.28.007.A № 31740/1). Выбор данного измерительного комплекса также обусловлен его частотой дискретизации – 100 Гц, что превышает максимальные значения фиксируемых частот собственных колебаний в несколько раз и удовлетворяет требованиям ГОСТ [29, п. 6.1.1.2]. Используемое измерительное оборудование комплекса «Тензор МС» представлено на рисунке 2.7. Блок сбора данных (рисунок 2.7, б) осуществляет сбор измеряемой информации с каждого вибродатчика-акселерометра (рисунок 2.7 а) по кабелям связи и передачу данных по беспроводному каналу связи на смартфон. Погрешность измерительного комплекса при определении частот собственных колебаний составляет 0,1 Гц.

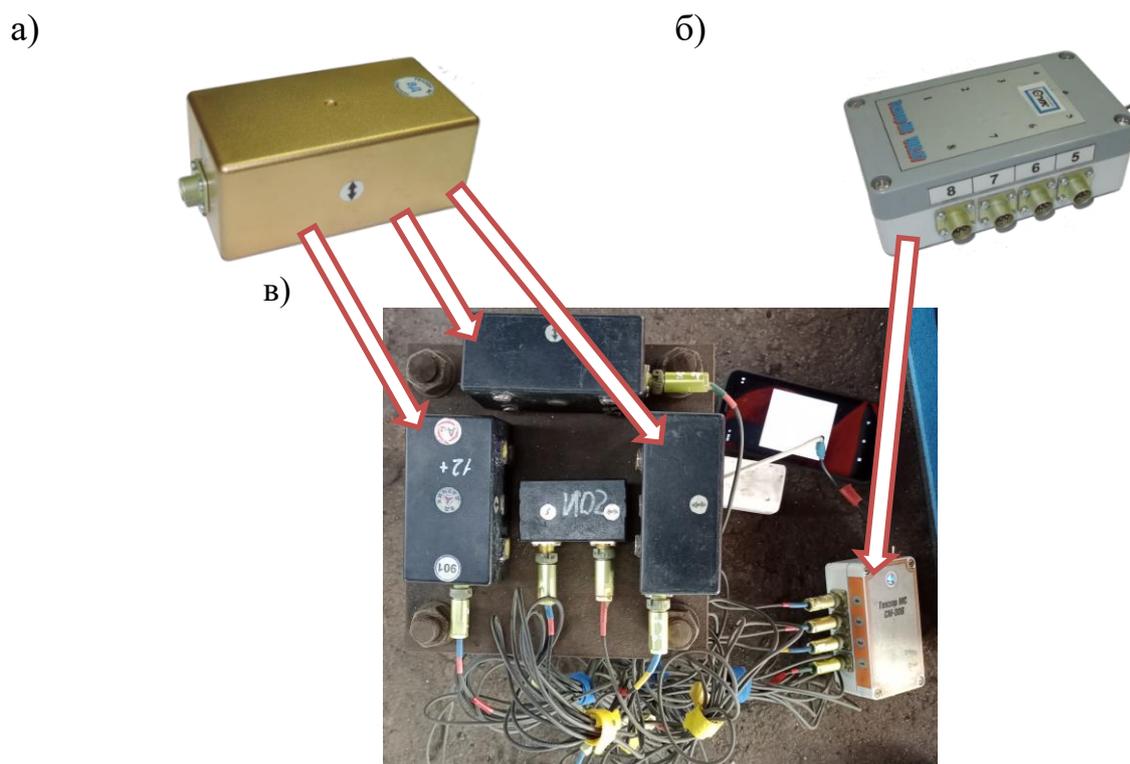


Рисунок 2.7 – Измерительный комплекс «Тензор МС»: а) вибродатчик-акселерометр; б) блок сбора данных; в) общий вид оборудования в сборе

Измерение фактического уровня грунта у опор выполнялись сотрудниками СибНИИ мостов СГУПС в рамках хозяйственно-договорных работ по комплексному подводно-техническому обследованию опор на сети ОАО «РЖД». Отметки грунта получены методом прямых измерений глубин в зоне местных

размывов с применением гидрологического комплекса, состоящего из эхолота-картплоттера, GPS-приемника и портативного компьютера для сбора и отображения измеряемых данных (рисунок 2.8, а). В качестве плавсредства использовали моторную лодку. Рабочая частота датчика-глубиномера (трансдюсера) составляла 900 кГц, датчика позиционирования – 1 Гц. Сбор данных о плановом положении GPS-приемника и глубине реки осуществлялся по протоколу NMEA-0183 при помощи специального программного обеспечения, установленного на компьютере. Для повышения детализации данных около опор выполняли несколько проходов на разном расстоянии от опор. Кроме того, величину местных размывов дна вокруг опоры фиксировали при помощи гидролокатора кругового обзора с рабочей частотой 675-900 кГц (рисунок 2.8, б). Пример результатов, получаемых с помощью гидрологического комплекса, приведены на рисунке 2.9. Результаты измерений с применением гидролокатора кругового обзора, описанные в статье коллектива СибНИИ мостов [109], представлены на рисунке 2.10.

а)

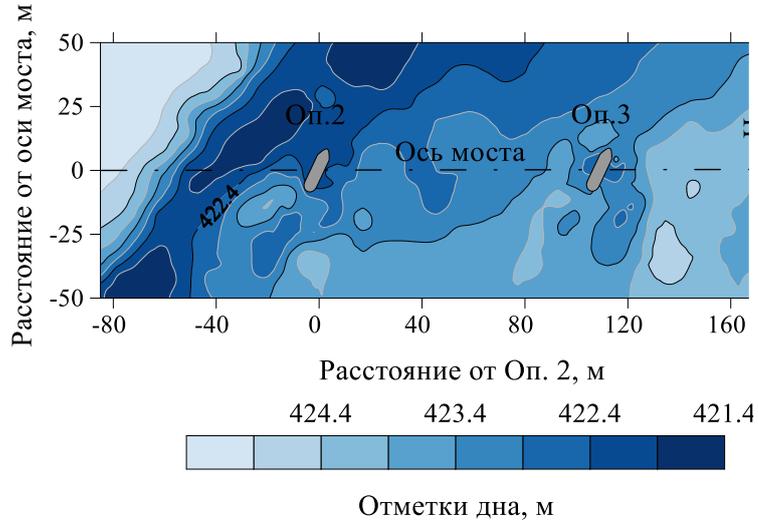


б)

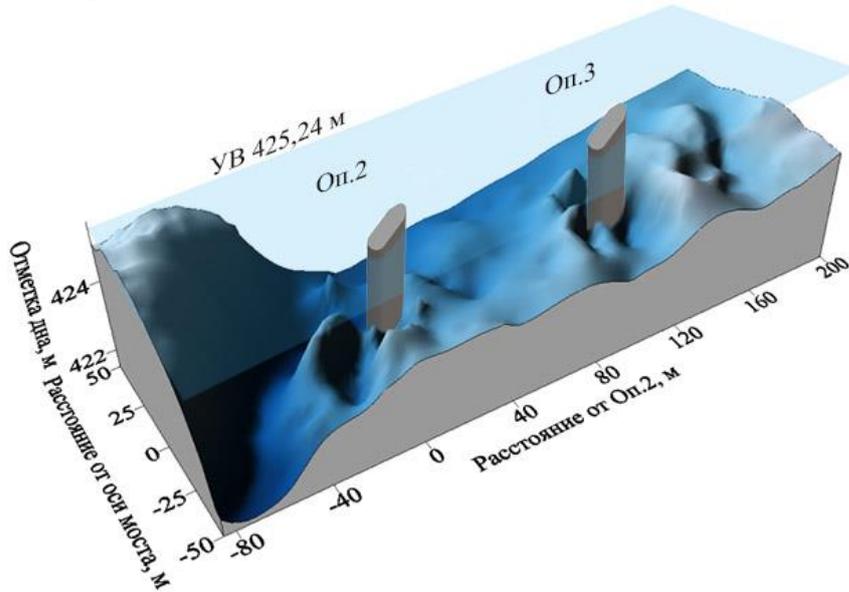


Рисунок 2.8 – Оборудование для промеров глубин в зоне местных размывов: а – эхолот; б – гидролокатор кругового обзора

а) топографический план рельефа дна



б) трехмерная поверхность дна



в) трехмерная поверхность дна с окрасом по высоте расположения облака точек

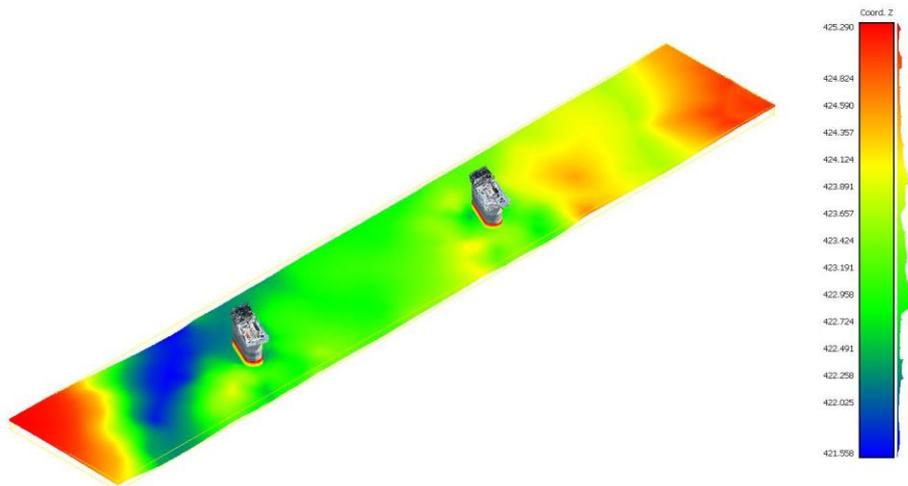


Рисунок 2.9 – Пример результатов гидролокационной съемки



Рисунок 2.10 – Акустическое изображение подводной конструкции опоры [109]

2) экспериментальная часть.

При проведении эксперимента выполняют фиксацию ускорений верха опор при колебаниях от прохода обращающейся по мосту железнодорожной нагрузки. В обязательном порядке необходимо определять фактический уровень грунта у опор для выявления зависимости между глубиной размыва и частотой собственных колебаний. Эксперименты проведены при различных вариациях параметров, указанных в таблице 2.1.

3) камеральная часть.

После проведения экспериментов проводят обработку полученных виброграмм колебаний, заключающуюся в получении спектров частот и выделении низших частот собственных колебаний различных конструкций опор при фактической глубине заложения фундаментов.

2.2 Проведение экспериментов по определению частот собственных колебаний различных конструкций опор

Для получения частот собственных колебаний опор при возможно большом количестве вариаций конструктивных параметров, приведенных в таблице 2.1, эксперименты проведены для 35 опор железнодорожных мостов М1...М14.

Вибродатчики-акселерометры измерительного комплекса «Тензор МС» устанавливаются на оголовки опоры – элемент опоры, имеющий максимальную

амплитуду колебаний. Датчики являются съемными и имеют магнитные подвесы для крепления. Поскольку все металлические конструкции на оголовке опоры (опорные части, смотровые ходики) имеют неплотное соединение с опорой, добавляющее шумы и «лишние» частоты колебаний при измерениях, то на оголовках были смонтированы специальные стационарные металлические столики. Столик, представленный на рисунке 2.11, устанавливается в центре оголовка опоры при помощи шпилек и выводится ими в горизонтальное положение. Столик оснащен защитной крышкой для исключения агрессивного воздействия окружающей среды на «рабочую» поверхность столика и на установленное оборудование. Для каждой опоры фиксировали колебания верха опоры в горизонтальной плоскости в продольном и поперечном направлениях и в вертикальной плоскости. Пример установки измерительной системы на опору приведен на рисунке 2.12. Процесс выведения опор из состояния равновесия представлял собой многократные проезды груженых составов по мосту.

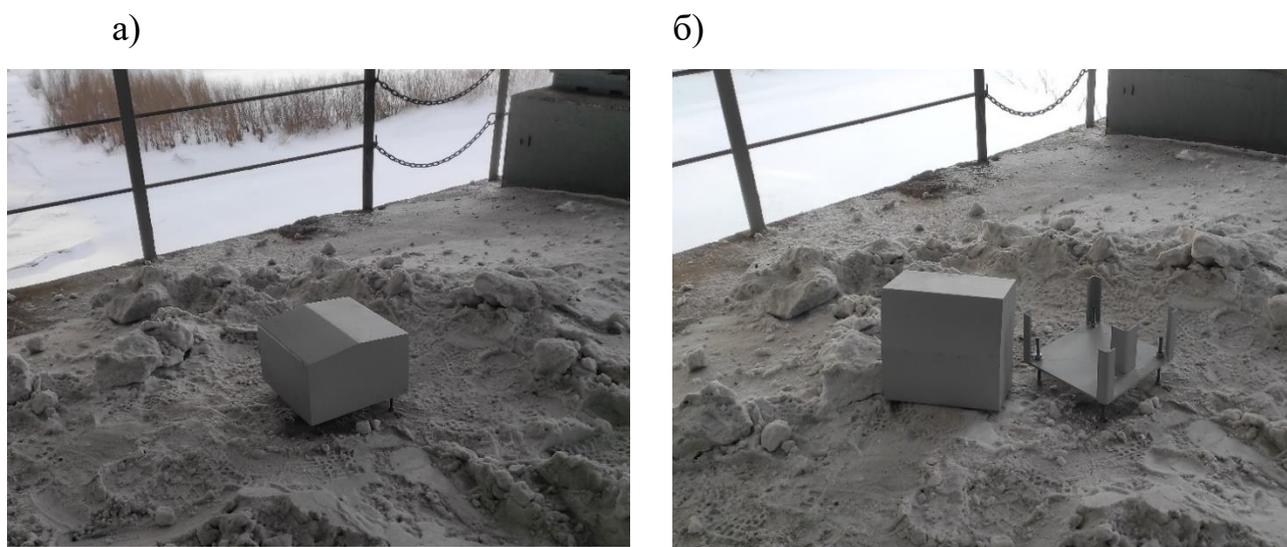


Рисунок 2.11 – Общий вид металлического столика, установленного на оголовке опоры: а – столик с защитной крышкой; б – столик со снятой защитной крышкой для установки измерительного оборудования



Рисунок 2.12– Пример установки измерительного оборудования

Конструктивные параметры опор, для которых проведены измерения частот собственных колебаний, сведены в таблицу 2.2. Следует отметить, что на четырех железнодорожных мостах расположены однотипные русловые опоры, отличающиеся только величиной размыва грунта у опор и, как следствие, глубиной заложения фундаментов (в таблице 2.2 выделены курсивом):

- две опоры моста М3;
- шесть опор моста М9;
- две опоры моста М10;
- две опоры моста М12.

Таблица 2.2 – Конструктивные параметры исследуемых опор

№ п/п	Объект	Тип опирающихся на опору пролетных строений	Тип опорных частей на опоре	Конструкция тела опоры	Высота опоры, измеряемая от уровня грунта, м	Тип фундамента	Глубина заложения фундамента, м	Класс грунта основания
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	мост М1 (опора О1)	сплошностенчатые балочные разрезные	шарово-сегментные подвижные и неподвижные	массивная монолитная	7,9	свайный	6,5	дисперсный несвязный, скальный
2	мост М2 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные секторные + неподвижные балансирные	массивная монолитная	6,3	массивный	5,8	дисперсный несвязный
3	мост М2 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные секторные + неподвижные балансирные	массивная монолитная	6,2	массивный	6,4	дисперсный несвязный
4	мост М2 (опора О3)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные шарово-сегментные + неподвижные балансирные	массивная монолитная	5,8	массивный	7,0	дисперсный несвязный
5	мост М3 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно-монолитная	11,8	массивный	2,3	дисперсный несвязный, скальный
6	мост М3 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно-монолитная	10,7	массивный	3,3	дисперсный несвязный, скальный
7	мост М4 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно-монолитная	9,7	свайный ростверк	23,7	дисперсный несвязный
8	мост М4 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно-монолитная	13,8	свайный ростверк	19,7	дисперсный несвязный
9	мост М4 (опора О3)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно-монолитная	10,8	свайный ростверк	28,7	дисперсный несвязный

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	мост М5 (опора О1)	сплошностенчатые балочные разрезные	шарово-сегментные подвижные и неподвижные	массивная сборно- монолитная	12,1	свайный ростверк	12,4	дисперсный несвязный, скальный
11	мост М6 (опора О1)	сплошностенчатые балочные разрезные	шарово-сегментные подвижные и неподвижные	массивная монолитная	11,1	массивный	2,3	дисперсный несвязный, скальный
12	мост М7 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	7,8	массивный	10,0	дисперсный несвязный
13	мост М7 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	7,6	массивный	8,8	дисперсный несвязный
14	мост М8 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	8,5	массивный	7,1	дисперсный несвязный, скальный
15	мост М8 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	8,9	массивный	9,0	дисперсный несвязный, скальный
16	мост М8 (опора О3)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	7,7	массивный	13,6	дисперсный несвязный
17	мост М9 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	14,1	массивный	9,9	дисперсный несвязный
18	мост М9 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	15,0	массивный	9,1	дисперсный несвязный
19	мост М9 (опора О3)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	16,3	массивный	7,8	дисперсный несвязный
20	мост М9 (опора О4)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	18,1	массивный	5,9	дисперсный несвязный

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	мост М9 (опора О5)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	18,0	массивный	6,1	дисперсный несвязный
22	мост М9 (опора О6)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	17,0	массивный	7,1	дисперсный несвязный
23	мост М10 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	14,8	свайный ростверк	13,3	дисперсный несвязный
24	мост М10 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	10,6	свайный ростверк	17,5	дисперсный несвязный
25	мост М11 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	тангенциальные подвижные и неподвижные	массивная сборно- монолитная	7,0	свайный ростверк	8,0	дисперсный несвязный, скальный
26	мост М11 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	тангенциальные подвижные и неподвижные	массивная сборно- монолитная	7,4	свайный ростверк	7,6	дисперсный несвязный, скальный
27	мост М12 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	тангенциальные подвижные и неподвижные	массивная монолитная	9,9	массивный	4,4	дисперсный несвязный, скальный
28	мост М12 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	тангенциальные подвижные и неподвижные	массивная монолитная	7,2	массивный	7,1	дисперсный несвязный, скальный
29	мост М13 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	21,9	свайный ростверк	7,2	дисперсный несвязный, скальный
30	мост М13 (опора О2)	сквозное решетчатое разрезные + сплошностенчатое балочное разрезное	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная монолитная	15,5	свайный ростверк	13,7	дисперсный несвязный, скальный
31	мост М14 (опора О1)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	12,4	свайный ростверк	23,5	дисперсный связный

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
32	мост М14 (опора О2)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	12,2	свайный ростверк	23,4	дисперсный связный
33	мост М14 (опора О3)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	11,8	свайный ростверк	23,7	дисперсный связный
34	мост М14 (опора О4)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	11,2	свайный ростверк	24,0	дисперсный связный
35	мост М14 (опора О5)	сквозные решетчатые разрезные	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивная сборно- монолитная	12,4	свайный ростверк	22,6	дисперсный связный

2.3 Обработка данных экспериментальных исследований

Результатами проведения экспериментов по определению частот собственных колебаний различных конструкций опор являются виброграммы ускорений, записанные измерительным комплексом «Тензор МС». Фрагменты виброграмм ускорений верха некоторых исследуемых опор различного конструктивного исполнения при колебаниях приведены на рисунках 2.13...2.16, а. Цвета графиков соответствуют направлению фиксируемых колебаний: **красный** – горизонтальные продольные колебания, **зеленый** – горизонтальные поперечные колебания, **синий** – вертикальные колебания. Всплески амплитуд на виброграммах соответствуют моментам проезда подвижной нагрузки по мосту. Примеры результатов измерений на рисунках 2.13...2.16 приведены для характерных конструкций опор, отличающихся типом фундамента и классом грунта основания (см. таблицу 2.2). Результаты измерений для опоры О1 совмещенного моста М14 (см. рисунок 2.16) отражают особенность выделения участка свободных колебаний при проходе по мосту не только железнодорожной, но и автодорожной нагрузки. Под свободными колебаниями понимаются колебания природно-техногенной системы после прекращения действия внешних нагрузок от подвижной нагрузки.

По результатам промеров глубин у опор с применение эхолота и гидролокатора кругового обзора получены фактические отметки дна вокруг опор по лучевым створам. Пример полученных результатов в традиционном виде приведен на рисунке 2.17 для одной из опор моста М2.

Обработка виброграмм выполнена с помощью специального программного обеспечения «Тензор МС», в результате которой получены спектры частот колебаний опор, представленные на рисунках 2.13...2.16, б. Программное обеспечение позволяет на основе быстрого преобразований Фурье [19, 88] для дискретного сигнала получить частоты колебаний конструкций в виде графика спектральной плотности мощности (спектра частот). Так, имея массив амплитуд

сигнала Y размером N , для получения спектра сигнала S используется следующая формула:

$$S[i] = \frac{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^N Y[k] \cos\left(\frac{2\pi k i}{N}\right)\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N -Y[k] \sin\left(\frac{2\pi k i}{N}\right)\right)^2}}{M}, \quad (2.1)$$

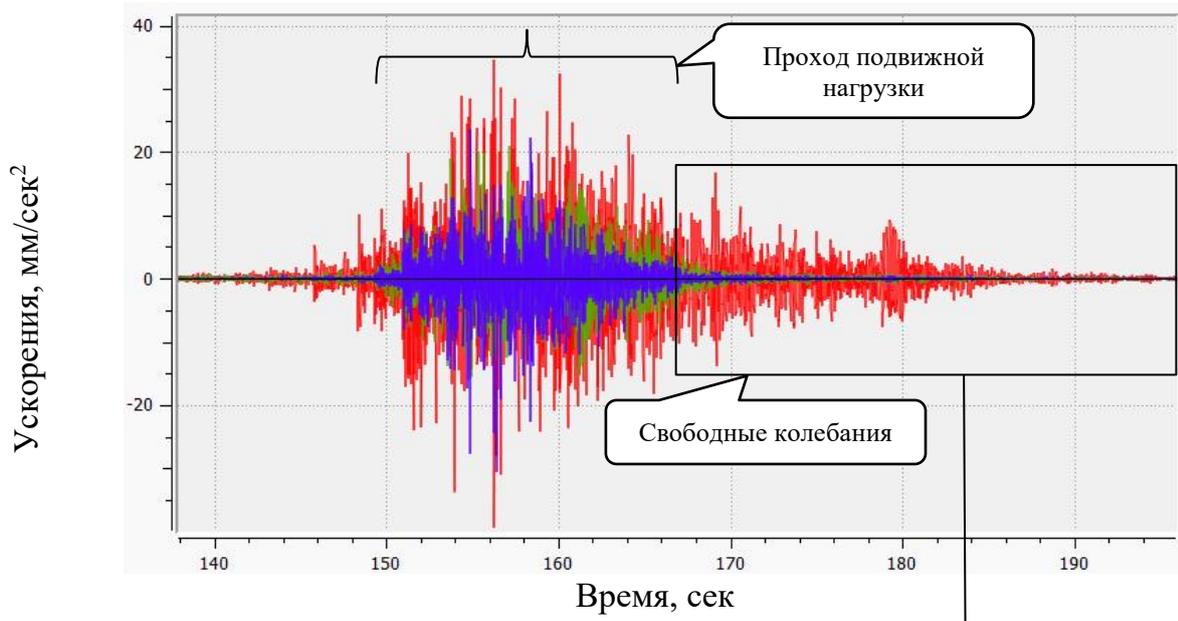
где $i = 1 \dots M$, $M = \frac{N}{2} + 1$.

Анализ виброграмм осуществляется на характерном участке свободных колебаний после прохода подвижной нагрузки для исключения влияния дополнительной массы на частоту колебаний, а также фиксации частот вынужденных колебаний.

Как видно из рисунков 2.13...2.16, колебательный процесс опоры носит сложный характер, при выведении опоры из состояния равновесия возбуждаются разные формы колебаний. По результатам обработки виброграмм и спектров частот установлено, что основной модой колебаний опоры является собственная частота в продольном направлении моста, обладающая максимальной интенсивностью. Собственные частоты и осредненные по контуру фундамента отметки грунта у исследуемых опор, зафиксированные при экспериментальных измерениях, сведены в таблицу 2.3.

Для однотипных русловых опор, отличающихся только глубиной заложения фундаментов, зафиксированы разные значения частот собственных колебаний (в таблице 2.3 выделены жирным). При меньшей глубине заложения фундамента наблюдаются меньшие значения частот собственных колебаний, что подтверждает зависимость частоты собственных колебаний природно-техногенной системы от глубины размыва.

а) фрагмент виброграмм колебаний



б) спектры частот свободных колебаний

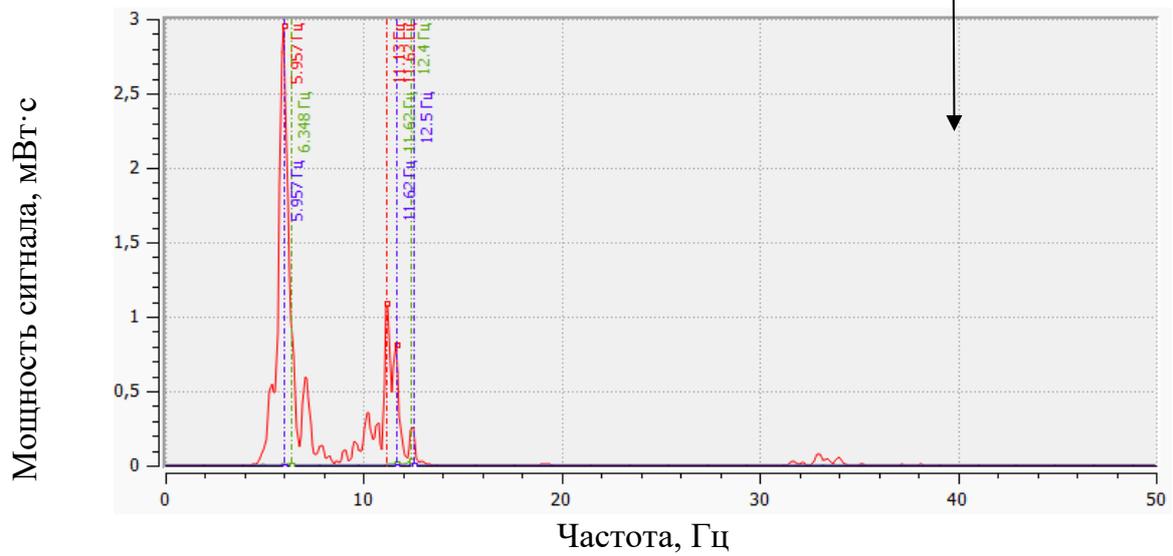
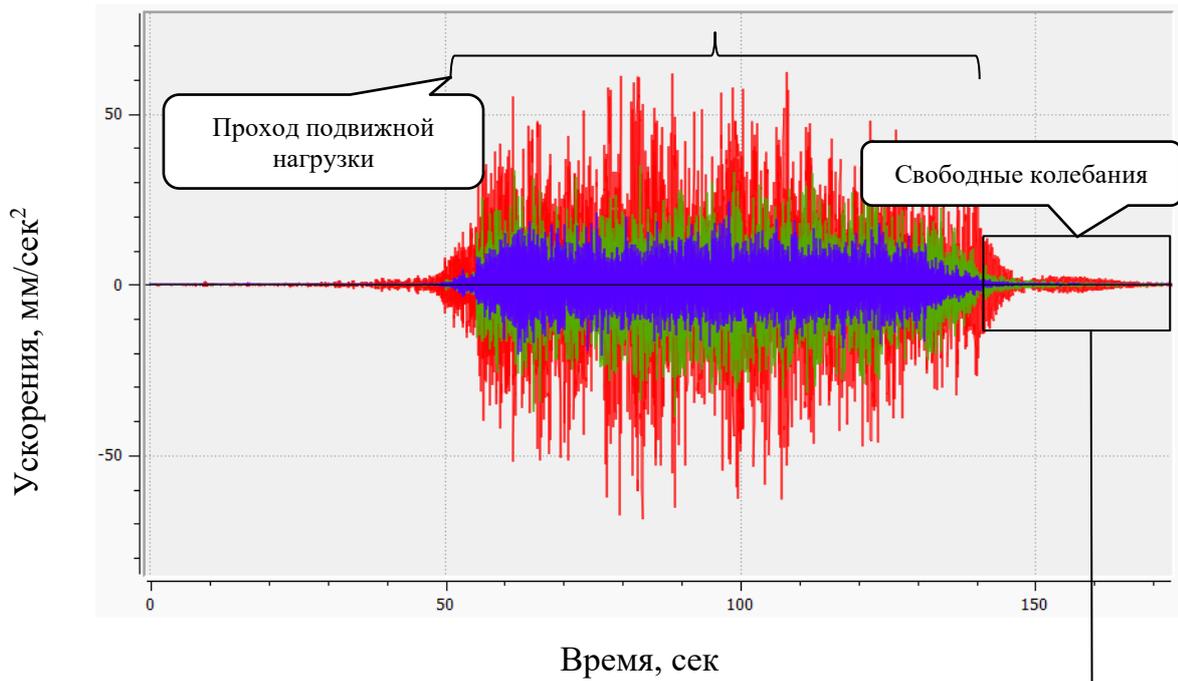


Рисунок 2.13 – Результаты измерений для опоры О1 моста М2

а) фрагмент виброграмм колебаний



б) спектры частот свободных колебаний

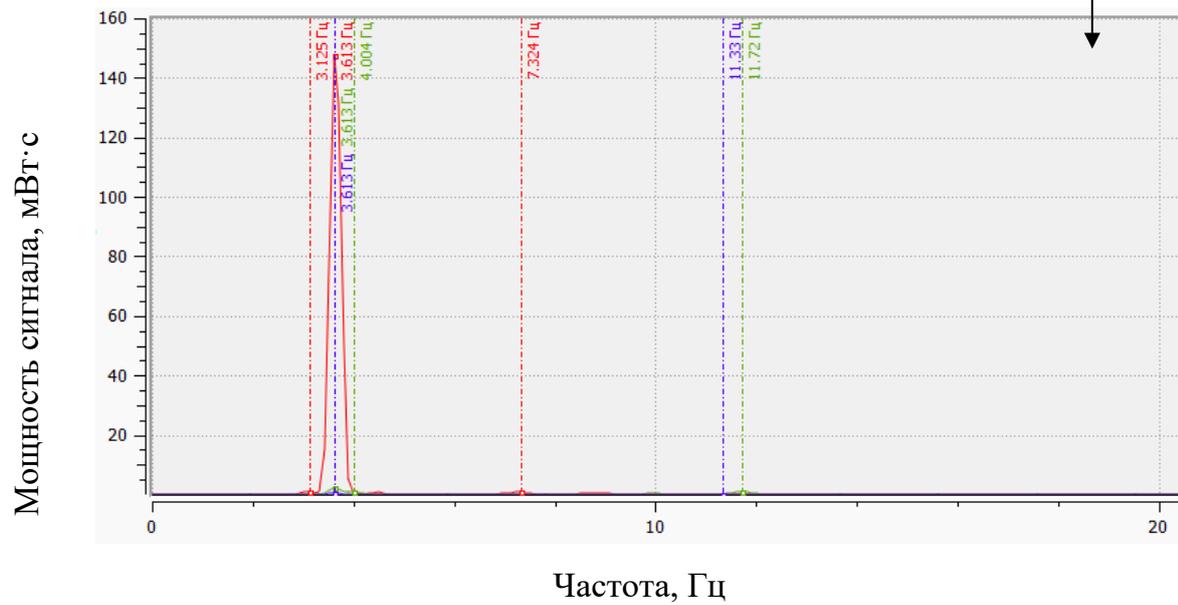
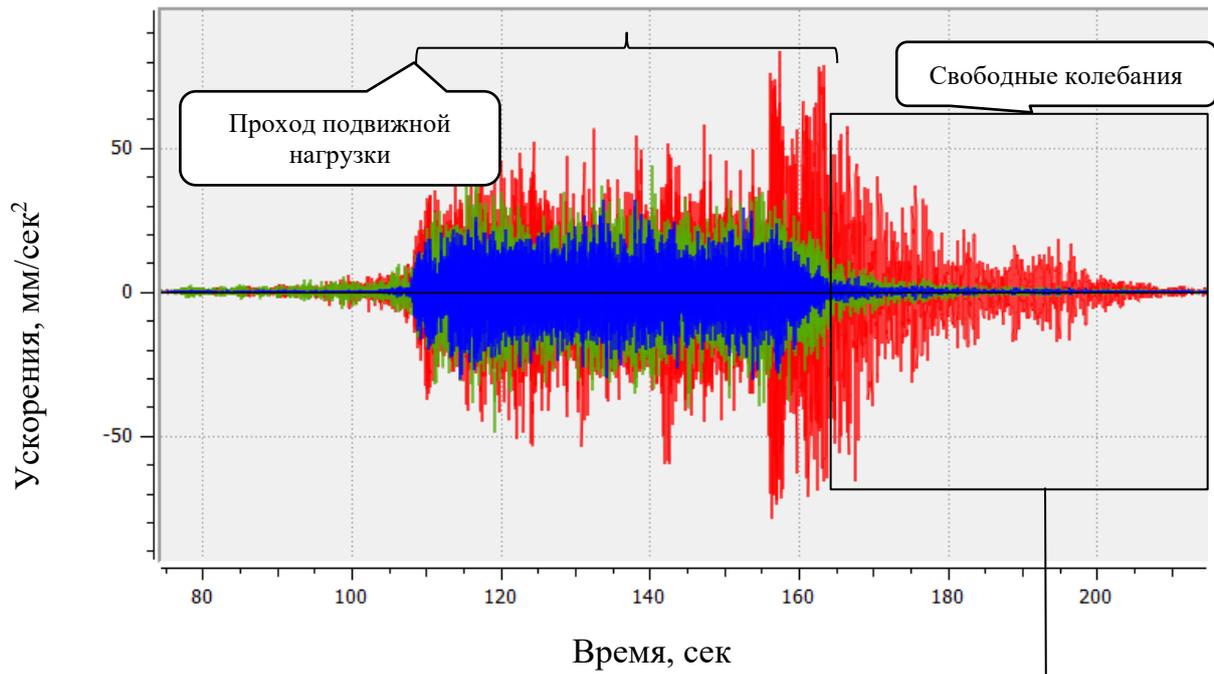


Рисунок 2.14 – Результаты измерений для опоры О1 моста МЗ

а) фрагмент виброграмм колебаний



б) спектры частот свободных колебаний

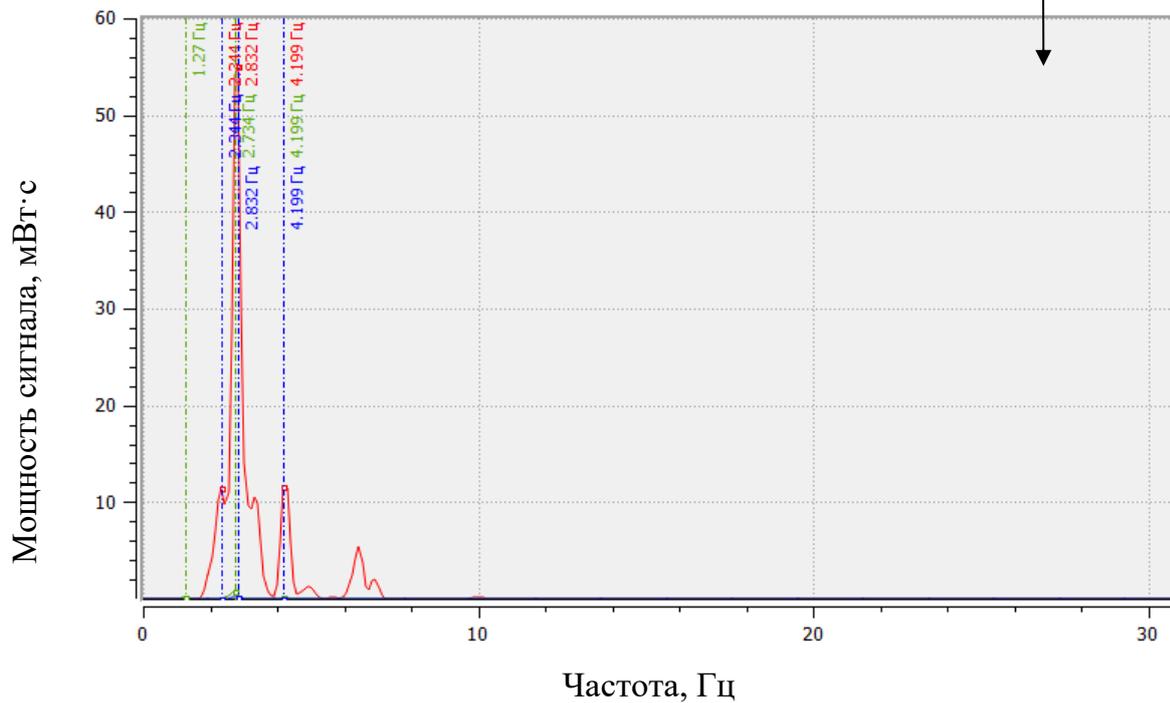
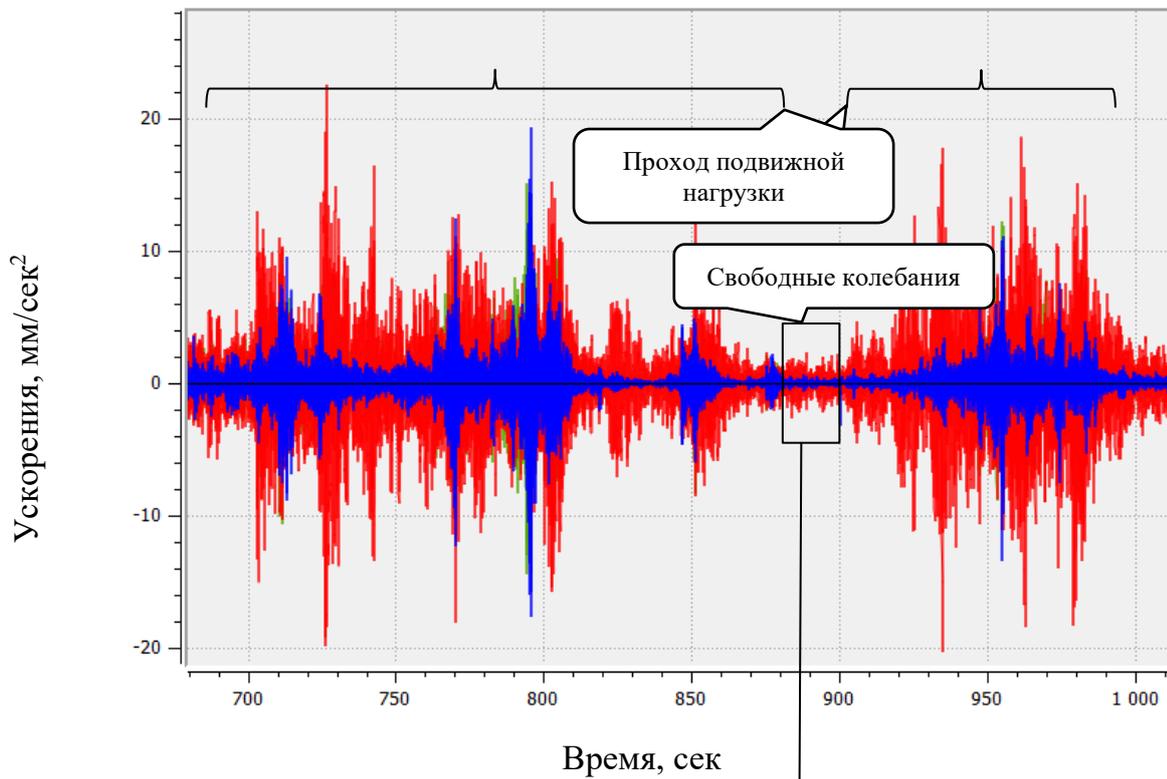


Рисунок 2.15 – Результаты измерений для опоры № 02 моста М13

а) фрагмент виброграмм колебаний



б) спектры частот свободных колебаний

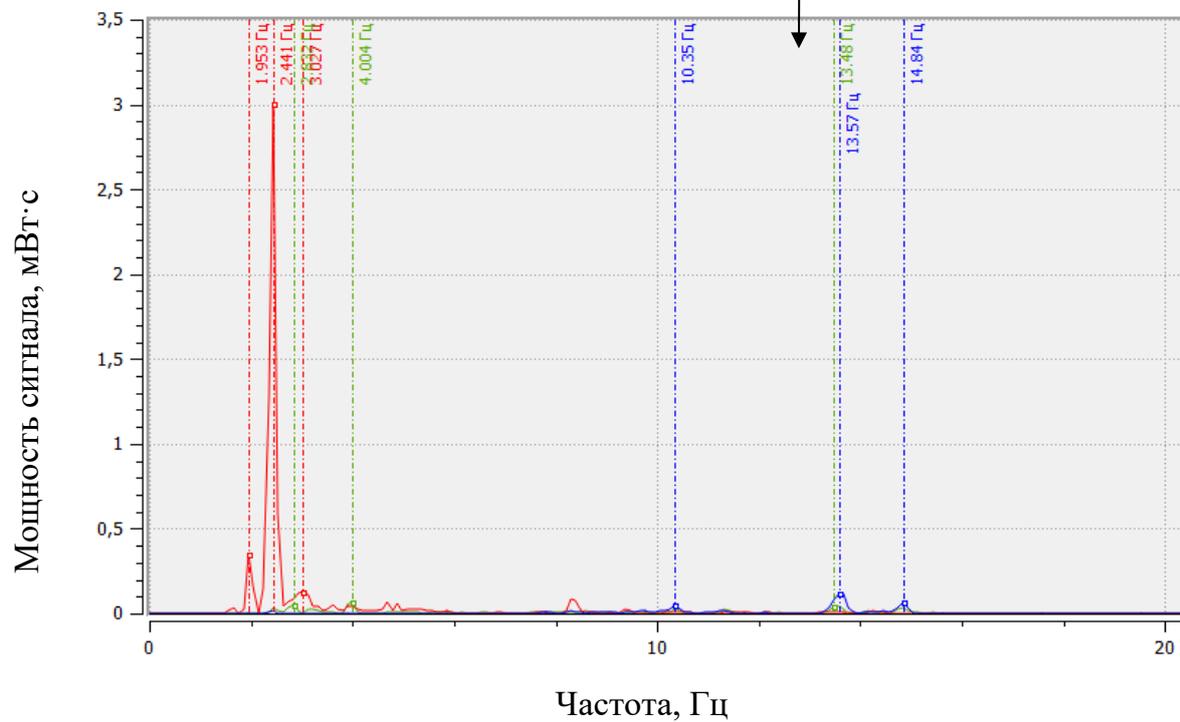


Рисунок 2.16– Результаты измерений для опоры О1 моста М14

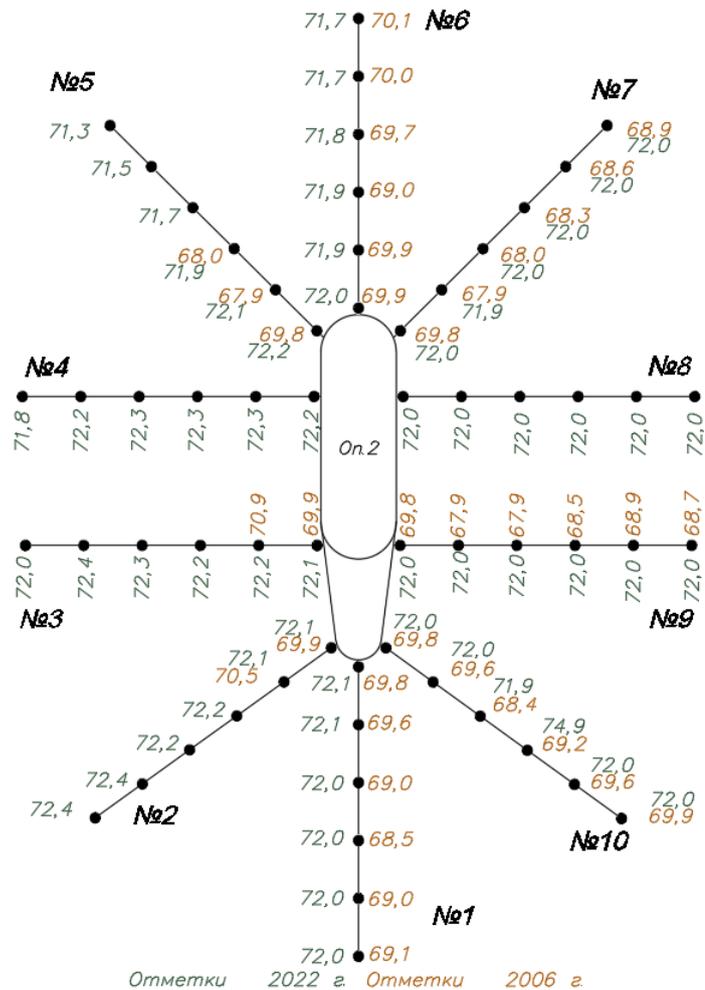


Рисунок 2.17 – Пример результатов определения фактических отметок грунта у опоры О2 моста М2

Таблица 2.3 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Объект	Частота, Гц	Средняя отметка грунта у опоры, м	Средняя глубина заложения фундамента, м	Средняя глубина размыва, м
1	2	3	4	5	6
1	мост М1 (опора О1)	3,2	493,8	6,5	0,3
2	мост М2 (опора О1)	6,0	71,4	5,8	1,3
3	мост М2 (опора О2)	6,1	72,1	6,4	0,0
4	мост М2 (опора О3)	5,6	72,5	7,0	0,3
5	мост М3 (опора О1)	3,6	477,8	2,3	1,1
6	мост М3 (опора О2)	3,7	478,8	3,3	0,5
7	мост М4 (опора О1)	3,2	392,8	23,7	0,0
8	мост М4 (опора О2)	3,2	388,8	19,7	2,1
9	мост М4 (опора О3)	4,2	391,7	28,7	0,0

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
10	мост М5 (опора О1)	4,4	471,7	12,4	0,0
11	мост М6 (опора О1)	4,9	482,8	2,3	2,3
12	мост М7 (опора О1)	3,6	52,0	10,0	0,2
13	мост М7 (опора О2)	3,6	52,2	8,8	0,3
14	мост М8 (опора О1)	3,0	48,6	7,1	0,0
15	мост М8 (опора О2)	3,1	48,4	9,0	1,2
16	мост М8 (опора О3)	3,0	49,4	13,6	1,1
17	мост М9 (опора О1)	3,5	31,9	9,9	0,4
18	мост М9 (опора О2)	3,5	31,1	9,1	1,2
19	мост М9 (опора О3)	3,5	29,8	7,8	2,5
20	мост М9 (опора О4)	3,1	27,9	5,9	4,4
21	мост М9 (опора О5)	3,1	28,0	6,1	4,3
22	мост М9 (опора О6)	3,5	29,0	7,1	3,3
23	мост М10 (опора О1)	3,8	129,4	13,3	4,6
24	мост М10 (опора О2)	4,0	133,5	17,5	0,5
25	мост М11 (опора О1)	3,8	221,5	8,0	0,0
26	мост М11 (опора О2)	3,8	221,1	7,6	0,4
27	мост М12 (опора О1)	3,6	217,8	4,4	3,0
28	мост М12 (опора О2)	3,9	220,5	7,1	0,3
29	мост М13 (опора О1)	2,6	103,5	7,2	5,4
30	мост М13 (опора О2)	2,8	109,8	13,7	0,7
31	мост М14 (опора О1)	2,4	26,4	23,5	0,3
32	мост М14 (опора О2)	2,4	26,3	23,4	0,4
33	мост М14 (опора О3)	2,8	26,6	23,7	0,1
34	мост М14 (опора О4)	2,7	26,9	24,0	0,4
35	мост М14 (опора О5)	2,8	25,5	22,6	1,8

Выводы по главе 2

Разработана программа экспериментальных исследований, предусматривающая проведение полевых работ с учетом возможности обеспечения изменения семи основных параметров, характеризующих природно-техногенную систему: типа опирающихся на опору пролетных строений, типа опорных частей на опоре, конструкции тела опоры, высоты тела опоры, конструкции фундамента опоры, глубины заложения фундамента и класса грунта основания.

Экспериментальные исследования частот собственных колебаний русловых опор проведены на 13 железнодорожных мостах и одном совмещенном мосту (всего 35 русловых опор) при различных инженерно-геологических условиях и конструктивных решениях, в том числе и для однотипных опор, отличающихся только величиной размыва грунта у опор и, как следствие, глубиной заложения фундаментов. В ходе исследований была получена репрезентативная выборка для определения зависимости частоты собственных колебаний от глубины размыва.

Таким образом, установлены экспериментальные качественные и количественные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем различного конструктивного исполнения от глубины размыва грунта у опор.

3 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПОР

Для прогнозирования изменений измеренных частот собственных колебаний опор (природно-техногенных систем) при развитии размыва проведены расчетные исследования. Как отмечалось в главе 1, общий подход к вычислению собственных частот колебаний опоры, апробированный на практике, отсутствует. Поэтому **целью** расчетных исследований является уточнение математической модели опоры с учётом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом, окружающим фундамент опоры.

3.1 Аналитический подход к определению частоты собственных колебаний опоры

В учебном пособии Я.Д. Лившица и др. [60] при описании особенностей расчета мостов на воздействие сейсмических нагрузок приведена формула для расчета периода собственных колебаний опоры постоянного сечения по первой форме:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{f}{g}}, \quad (3.1)$$

где f – прогиб конца консоли в центре приведения масс, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Расчетная схема опоры постоянного сечения для расчета периода собственных колебаний представлена на рисунке 3.1. Расчетная схема опоры представляет собой жестко заделанный стержень высотой H с центром приведения масс на конце консоли. Масса опоры, приложенная к центру приведения масс, принимается с учетом коэффициента приведения, равного 0,23. Тогда массы пролетного строения и опоры вычисляются по формулам [60]:

$$m_{\text{пс}} = \frac{G_{\text{пс}}}{g}, \quad (3.2)$$

$$m_{\text{оп.пр.}} = 0,23 \cdot \frac{G_{\text{оп.}}}{g}, \quad (3.3)$$

где $G_{\text{пс}}$ и $G_{\text{оп}}$ – вес пролетных строений, приходящийся на одну опору, и вес опоры соответственно.

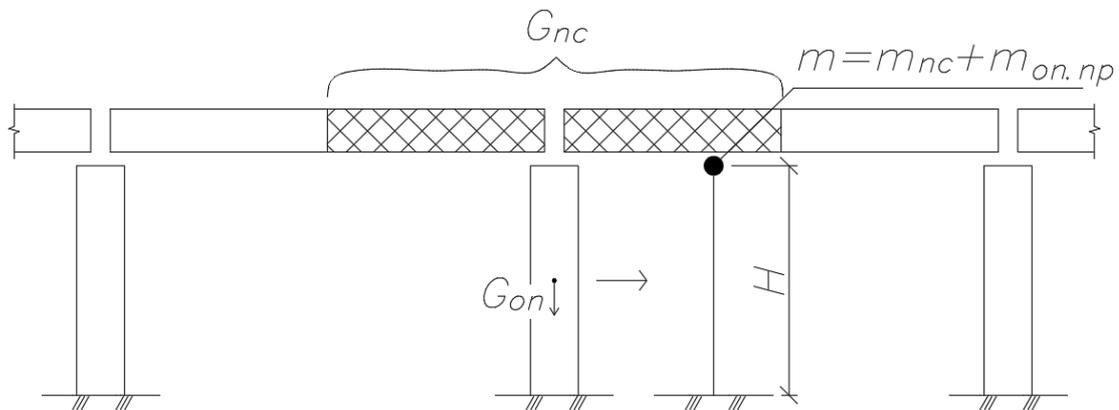


Рисунок 3.1 – Расчетная схема опоры постоянного сечения для расчета периода собственных колебаний

Прогиб конца консоли, на котором сосредоточена масса m , равен:

$$f = \frac{(m_{\text{пс}} + m_{\text{оп.пр.}}) \cdot g \cdot H^3}{3 \cdot EI} = \frac{(G_{\text{пс}} + 0,23 \cdot G_{\text{оп}}) \cdot H^3}{3 \cdot EI}, \quad (3.4)$$

где EI – жесткость опоры в направлении, перпендикулярном направлению колебаний.

Тогда формула для вычисления периода собственных колебаний опоры постоянного сечения по первой форме примет вид:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(G_{\text{пс}} + 0,23 \cdot G_{\text{оп}}) \cdot H^3}{3 \cdot g \cdot EI}}, \quad (3.5)$$

При этом частота собственных колебаний обратно пропорциональная периоду колебаний:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (3.6)$$

На практике опоры, имеющие одинаковую жесткость по высоте H , встречаются крайне редко. В случае опоры переменной жесткости расчетная схема консольного стержня принимается в виде невесомой консоли с несколькими сосредоточенными массами по его длине (рисунок 3.2). Период собственных

колебаний опоры переменной жесткости по первой форме вычисляется по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n G_i X_i^2}{\sum_{i=1}^n G_i X_i}} \quad (3.7)$$

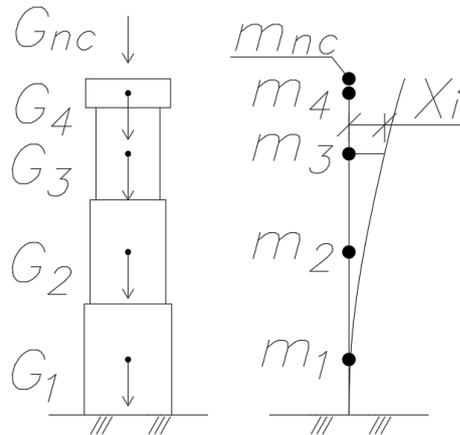


Рисунок 3.2 – Расчетная схема опоры переменного сечения для расчета периода собственных колебаний

Для расчетных схем, представленных на рисунках 3.1 и 3.2, определение уровня жесткой заделки согласно [24, 95] производится следующим образом. Для опор на массивном фундаменте жесткая заделка стержня принимается в уровне обреза фундамента. Для опор на свайных фундаментах уровень жёсткой заделки допускается определять ниже поверхности грунта на расстояние $2/\alpha_c$. Расстояние от верха опоры до жесткой заделки при этом будет равно:

$$H = h_0 + 2/\alpha_c, \quad (3.8)$$

где h_0 – расстояние от верха опоры до поверхности грунта, м;

α_c – коэффициент деформации сваи (столба), m^{-1} , определяемый по формуле:

$$\alpha_c = \sqrt[5]{\frac{K b_p}{E I_c}}, \quad (3.9)$$

где K – коэффициент пропорциональности грунта, kH/m^4 , определяемый по [95];

b_p – условная (расчетная) ширина сваи (столба), м, принимается равной: при $d \geq 0,8$ м $b_p = d + 1,0$ м, в остальных случаях $b_p = 1,5d + 0,5$ м;

d – наружный диаметр круглого сечения или сторона прямоугольного сечения в плоскости, перпендикулярной действию нагрузки;

EI_c – жесткость поперечного сечения сваи в плоскости изгиба, $\text{kH} \cdot \text{м}^2$.

В случае, если расчетный уровень жесткой заделки находится в толще скального грунта, то заделка принимается по границе скального грунта.

Величина коэффициента K зависит от вида грунта и его основных характеристик: коэффициента пористости для несвязных грунтов и показателя текучести для связных грунтов. При наличии в пределах глубины погружения сваи нескольких слоев грунта с разными характеристиками в расчет вводят приведенное значение K . Например, если в пределах глубины $h_k = 3,5d + 1,5$ м, отсчитываемой от поверхности грунта, расположено три слоя грунта, то приведенное значение коэффициента пропорциональности согласно [89] вычисляется по формуле:

$$K = \frac{K_1 \cdot h_1 \cdot [2(h_3 + h_2) + h_1] + K_2 \cdot h_2 \cdot (2h_3 + h_2) + K_3 \cdot h_3^3}{h_k^2}, \quad (3.10)$$

где h_1, h_2, h_3 – толщина соответственно первого (верхнего), второго и третьего слоев грунта в пределах глубины h_k , м;

K_1, K_2, K_3 – коэффициенты пропорциональности соответственно для первого, второго и третьего слоев грунта, $\text{kH}/\text{м}^4$.

Описанный аналитический метод расчета обладает рядом недостатков. Определение уровня жесткой заделки справедливо для расчета опоры по предельным состояниям и никак не учитывает влияние отпора грунта выше этой заделки на частоты собственных колебаний опоры. Метод расчета периода собственных колебаний учитывает только массу опирающихся на опору пролетных строений и принадлежащих к ним конструкций мостового полотна, но никак не учитывает жесткость самих пролетных строений. Но поскольку пролетные строения и опора связаны между собой опорными частями, то они не могут колебаться отдельно друг от друга. Использование этого допущения при определении сейсмической нагрузки оправдано и позволяет выполнять расчеты для наиболее неблагоприятного случая «в запас». Но, говоря о частоте собственных колебаний опоры, фиксируемой по результатам натурных измерений (см. раздел 2),

справедливо уточнение, что это частота колебаний не отдельной опоры, а всей природно-технической системы, состоящей из опоры, опирающихся на нее через опорные части пролетных строений и грунта, окружающего фундамент опоры. Определение частоты колебаний сложной системы аналитическими методами чрезмерно трудоёмко, поэтому дальнейшие расчетные исследования проведены в программном комплексе MidasCivil [134], основанном на методе конечных элементов (МКЭ).

3.2 Моделирование опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания для расчета частот собственных колебаний

В настоящее время метод конечных элементов получил широкое применение для всех видов инженерных статических и динамических расчётов. МКЭ основан на представлении реальной сплошной конструкции её дискретной моделью. Суть метода заключается в том, что область, занимаемая конструкцией, разбивается на некоторое число малых, но конечных по размерам подобластей. Конечные элементы объединяются между собой в узлах, к которым прикладываются граничные условия и внешние нагрузки. Для расчета динамических характеристик мостовых конструкций МКЭ применялся, например, С.П. Глушковым [26], Т.М. Барановым [5], О.В. Крутиковым [55], Л.Ю. Соловьевым [91] и др.

Динамические характеристики при конечно-элементном расчете определяются матрицами массы и жесткости конструкций. Расчет собственных частот при использовании МКЭ сводится к расчету характеристического уравнения:

$$[K] \cdot \{\Phi_n\} = \omega_n^2 \cdot [M] \cdot \{\Phi_n\}, \quad (3.11)$$

где $[K]$ – матрица жесткости;

$\{\Phi_n\}$ – собственный вектор (форма колебаний) n -ой моды;

ω_n^2 – собственная частота n -ой моды;

$[M]$ – матрица масс.

В ходе расчетных исследований решались задачи по оценке характера работы опорных частей при свободных колебаниях конструкции, а также по выявлению необходимой степени детальности моделирования для получения данных, соответствующих фактически зафиксированным.

Моделирование опоры на свайном фундаменте выполнено стержневыми конечными элементами с шестью степенями свободы в узле. Взаимодействие свайного фундамента с грунтом основания смоделировано одноузловыми связями, жёсткость которых в горизонтальных направлениях ($k_{xy(i)}$), согласно [52], вычисляется по формуле (3.13). При действии поперечных нагрузок грунт считается линейно-деформируемой средой, свойства которой характеризуются коэффициентом постели C_{xy} (основание Фусса-Винклера), линейно возрастающим по глубине инженерно-геологического элемента:

$$C_{xy(i)} = K_i \cdot z_i, \quad (3.12)$$

где K_i – коэффициент пропорциональности грунта для i -го узла конечно-элементной сетки, кН/м⁴, определяемый по [95];

z_i – глубина заложения i -го узла конечно-элементной сетки, м.

$$k_{xy(i)} = C_{xy(i)} \cdot d_p \cdot h_{zi} = K_i \cdot z_i \cdot d_p \cdot h_{zi}, \quad (3.13)$$

где d_p – расчетный (приведенный) размер несущего элемента (сваи) в поперечном направлении, вычисляемый по формулам:

$$\text{при } d < 0,8 \text{ м:} \quad d_p = k_э \cdot (1,5d + 0,5), \quad (3.14)$$

$$\text{при } d \geq 0,8 \text{ м:} \quad d_p = k_э \cdot k_в \cdot (d + 1), \quad (3.15)$$

где $k_э$ – коэффициент формы, равный 0,9 для круглого (кольцевого) сечения и 1,0 для квадратного (прямоугольного) сечения;

d – размер сваи в направлении, перпендикулярном плоскости действия нагрузки, м;

$k_в$ – коэффициент, учитывающий взаимное влияние несущих элементов, расположенных в одном ряду, параллельном плоскости действия нагрузки, определяемый по формуле:

$$k_B = B + \frac{0,5 \cdot L \cdot (1 - B)}{d + 1}, \quad (3.16)$$

где B – коэффициент, зависящий от числа столбов в ряду n , параллельном плоскости действия нагрузки (при $n = 1$ $B=1,0$; при $n = 2$ $B=0,6$; при $n = 3$ $B=0,5$ и при $n \geq 4$ $B = 0,45$);

L – расстояние между соседними сваями в свету в ряду, параллельном плоскости действия нагрузки, м;

h_{zi} – длина сбора нагрузки на i -й узел конечно-элементной сетки, м, вычисляемая по формуле:

$$h_{zi} = 0,5 \cdot (l_1 + l_2), \quad (3.17)$$

l_1 и l_2 – длины элементов, прилегающих к i -му узлу конечно-элементной сетки, м.

Нижний конец сваи (столба), опирающейся на нескальный грунт, закрепляется от вертикального перемещения одноузловой связью, жесткость которой вычисляется по формуле:

$$k_z = C_z \cdot F_{\Pi}, \quad (3.18)$$

где F_{Π} – площадь подошвы сваи (столба), м²;

C_z – коэффициент постели по подошве сваи (столба), кН/м³, равный:

$$C_z = \frac{5K_{\Pi} \cdot h_{\Pi}}{d_{\Pi}} \geq \frac{50K_{\Pi}}{d_{\Pi}}, \quad (3.19)$$

где K_{Π} – коэффициент пропорциональности грунта, расположенного под подошвой сваи (столба), кН/м⁴;

h_{Π} – глубина расположения подошвы сваи (столба), м;

d_{Π} – диаметр подошвы сваи (столба), м.

Моделирование опоры на массивном фундаменте выполняется с некоторой особенностью. Тело опоры может быть смоделировано также стержневыми элементами, как и для опоры на свайном фундаменте. Но при этом сам фундамент моделируется исключительно объемными элементами. Эта особенность связана с тем, что размеры поперечного сечения массивного фундамента соизмеримы с его высотой, что нельзя сказать о свае, у которой размеры поперечного сечения много меньше её длины. Взаимодействие массивного фундамента с грунтом основания

моделируется одноузловыми связями, жёсткость которых вычисляется аналогично свайному фундаменту по формулам (3.12) - (3.19). При этом вычисленные жесткости связей равномерно распределяются по контуру фундамента в заданных направлениях.

Значение коэффициента пропорциональности грунта согласно [52] может варьироваться в больших диапазонах. Для некоторых типов грунта проведены исследования влияния коэффициента пропорциональности на частоту собственных колебаний природно-техногенной системы. Выбраны два объекта разнообразного конструктивного исполнения, фундаменты которых заглублены в различные грунты, и выполнены расчеты частот при минимальном, максимальном и среднем значениях коэффициентов пропорциональности при различной глубине заложения фундаментов. Результаты исследований сведены в таблицу 3.1. Как видно из таблицы, отклонение частот собственных колебаний при задании максимального и минимального значений коэффициента пропорциональности находится в пределах 0,03...0,13 Гц. Данное отклонение не является значительным, поэтому при расчетах допускается применение среднего значения коэффициента пропорциональности грунтов.

Таблица 3.1 – Результаты исследований влияния значения коэффициента пропорциональности на частоты собственных колебаний природно-техногенных систем

Объект	Грунты	Глубина заложения фундамента, м	ν при K_{min} , Гц	ν при K_{cp} , Гц	ν при K_{max} , Гц
мост М9 (опора О3)	Пески средней крупности $K = 4000 \dots 6000$	10,3	3,72	3,76	3,77
		6,0	3,19	3,24	3,32
		1,0	1,51	1,53	1,55
мост М14 (опора О1)	Глины мягкопластичные $K = 2330 \dots 4000$ и суглинки твердые $K = 6000 \dots 10000$	23,8	2,51	2,53	2,54
		8,8	2,60	2,63	2,65
		3,8	1,35	1,39	1,44

По результатам натурных измерений (см. рисунок 2.17) можно наблюдать, что фактический уровень грунта у опоры неравномерен по контуру фундамента.

Исходя из этого проведены исследования влияния неравномерности уровня грунта на частоты собственных колебаний. Расчеты частот собственных колебаний опоры выполнялись при моделировании переменного и осредненного уровня грунта по контуру фундамента. Расчетное отклонение значения частоты при допущении о равномерной глубине заложения фундамента от значения при моделировании фактического переменного по контуру фундамента уровня грунта составило 0,003 Гц, что является допустимым при точности натуральных измерений частоты 0,1 Гц. Ввиду этого при дальнейших расчетах закладывается осредненная по контуру фундамента отметка грунта, полученная в ходе натуральных измерений, что позволяет снизить трудоёмкость моделирования.

Для расчета частот собственных колебаний рекомендации по учету совместной работы опоры с опирающимися на неё пролетными строениями отсутствуют. Ввиду этого осуществлена выборка наиболее характерных конструкций опор, для которых проведены расчётные исследования. Исследования заключались в моделировании совместной работы опоры с опирающимися на неё пролетными строениями тремя способами. Первый способ заключался в моделировании опоры и приложении на оголовки опоры массы пролетных строений и мостового полотна. Этот способ схож с аналитическим подходом. При таком моделировании учитывается отпор грунта на всей глубине заложения фундамента, но также, как и при аналитическом способе, не учитывается жесткость самих пролетных строений. Конечно-элементная модель опоры по первому способу представлена на рисунке 3.3. Второй и третий способы более трудоёмки и учитывают жесткость пролетных строений, опирающихся на опору. Учёт жесткости производится путем моделирования самих пролетных строений с приложенной на них нагрузкой от веса мостового полотна. Пример конечно-элементной модели опоры с пролетными строениями приведен на рисунке 3.4. Второй и третий способы отличаются друг от друга моделированием опорных частей. В одном случае моделирование подвижных и неподвижных опорных частей выполнено в соответствии с их конструкцией. А в другом случае выдвинута гипотеза, что подвижные опорные части при свободных колебаниях конструкции

работают как неподвижные, т.е. сила трения в опорной части больше активного горизонтального воздействия. Моделирование опорных частей осуществляется двухузловыми связями и представлено на рисунке 3.5.

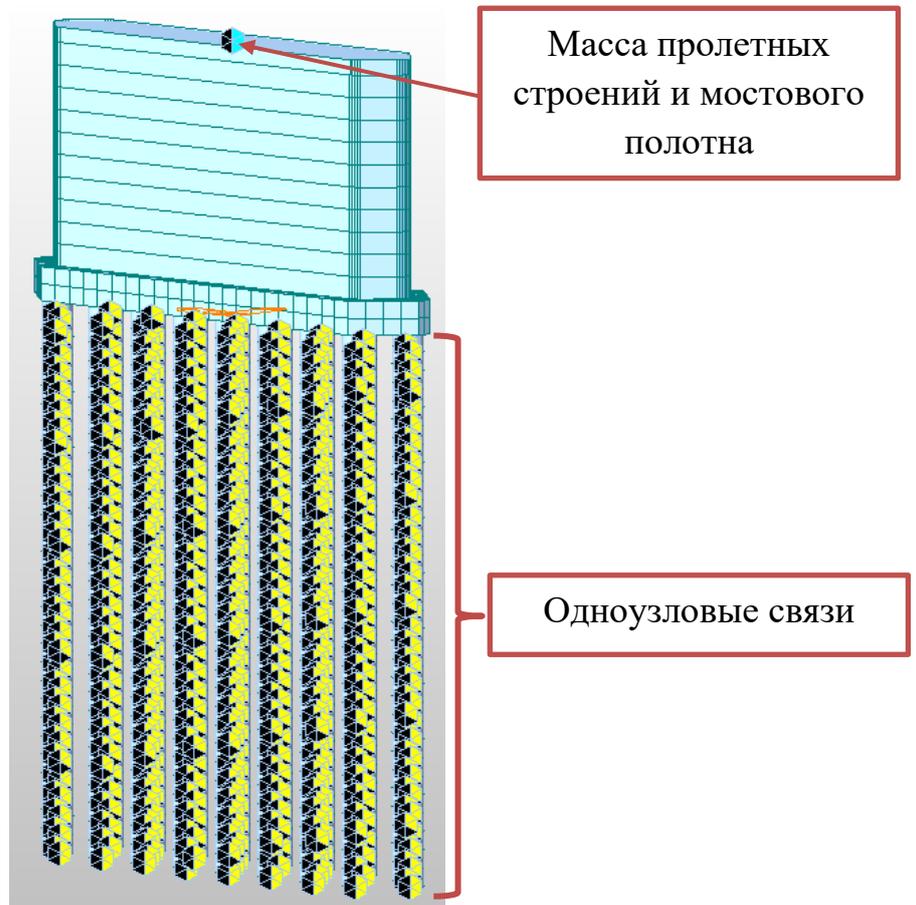


Рисунок 3.3 – Общий вид конечно-элементной модели опоры по первому способу

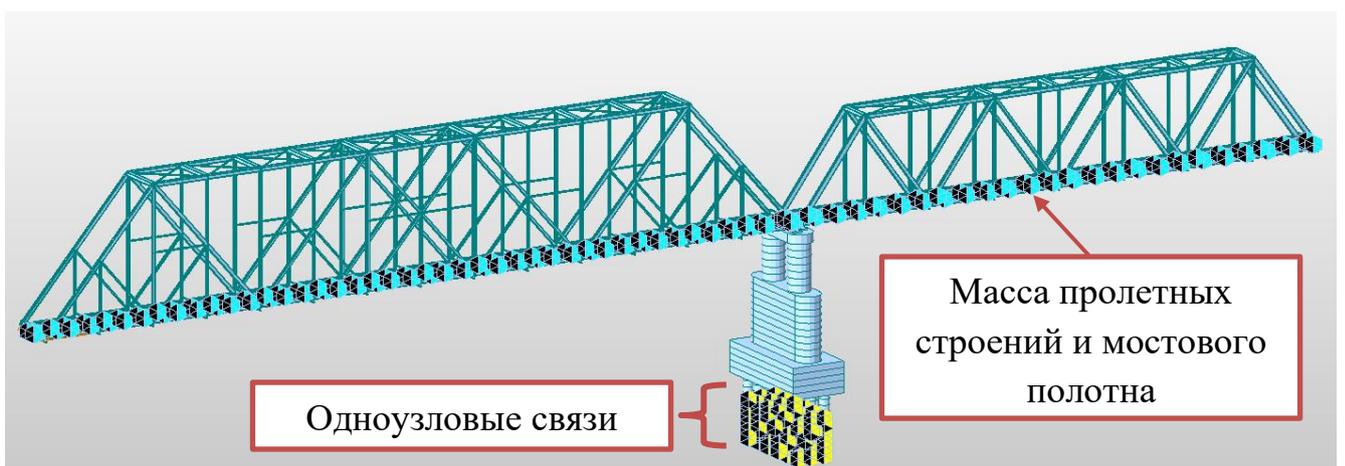


Рисунок 3.4 – Общий вид конечно-элементной модели опоры и опирающихся на неё пролетных строений

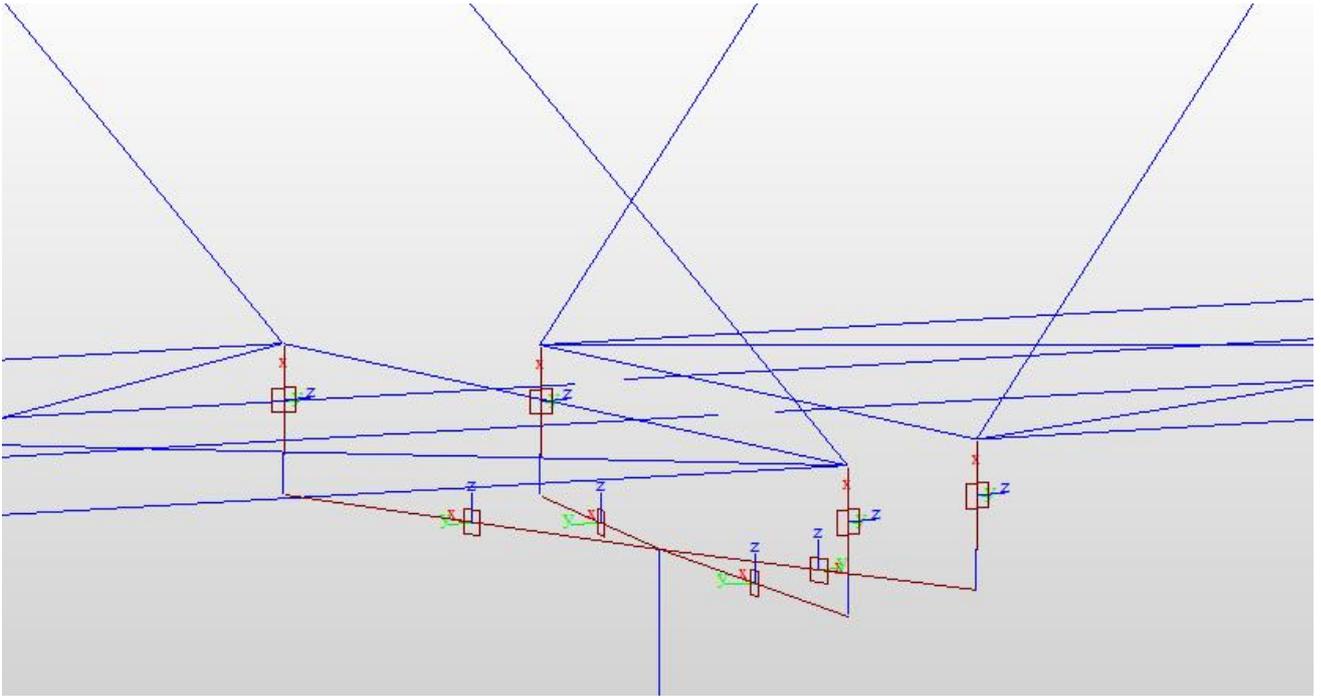


Рисунок 3.5 – Двухузловые связи, моделирующие опорные части

Расчетные исследования по трем способам проведены для шести опор (таблица 3.2): трех опор на свайном фундаменте и трех опор на массивном фундаменте. По результатам расчетов анализировались частоты первой формы колебаний, которой соответствуют колебания опоры в продольном направлении моста. При этом для второго и третьего способов помимо колебаний опоры происходят колебания пролетных строений. Общие виды первой формы колебаний для трех способов моделирования представлены на рисунках 3.6...3.8.

Таблица 3.2 – Конструктивные параметры исследуемых опор

№ п/п	Объект	Тип опорных частей на опоре	Тип фундамента	Класс грунта основания
1	мост М5 (опора О1)	шарово-сегментные подвижные и неподвижные	свайный ростверк	дисперсный несвязный, скальный
2	мост М4 (опора О3)	подвижные катковые + неподвижные балансирные	свайный ростверк	дисперсный несвязный
3	мост М14 (опора О1)	подвижные катковые + неподвижные балансирные	свайный ростверк	дисперсный связный
4	мост М6 (опора О1)	шарово-сегментные подвижные и неподвижные	массивный	дисперсный несвязный, скальный
5	мост М9 (опора О1)	подвижные катковые + неподвижные балансирные	массивный	дисперсный несвязный
6	мост М2 (опора О3)	подвижные шарово- сегментные + неподвижные балансирные	массивный	дисперсный несвязный

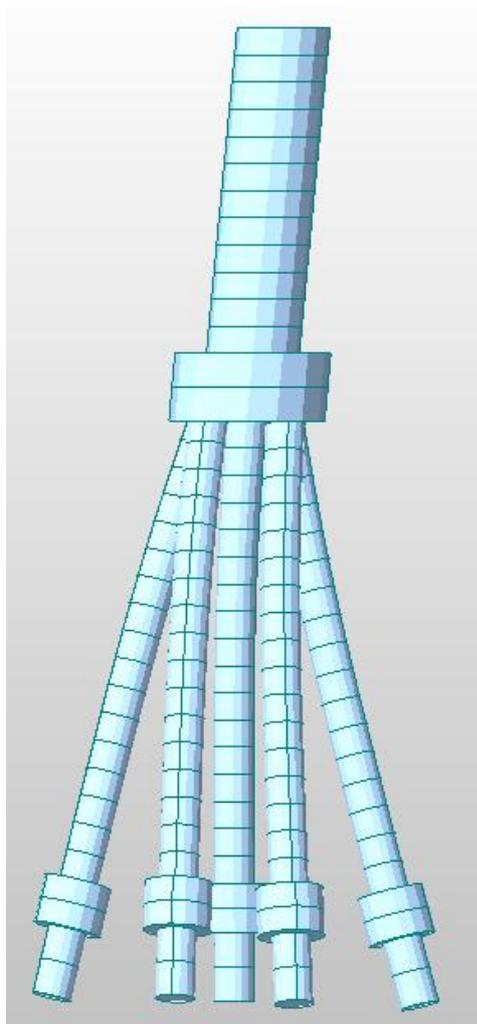


Рисунок 3.6 – Первая форма колебаний опоры при моделировании пролетных строений в виде приложенной массы (первый способ)

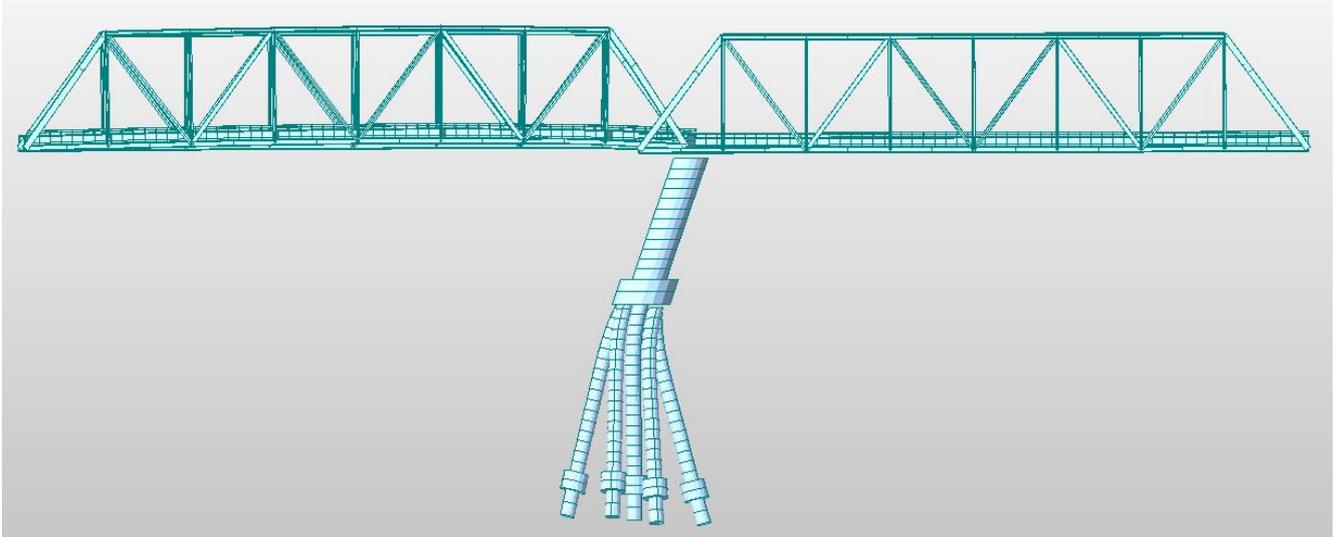


Рисунок 3.7 – Первая форма колебаний опоры и опирающихся на неё пролетных строений при моделировании опорных частей в соответствии с их конструкцией (второй способ)

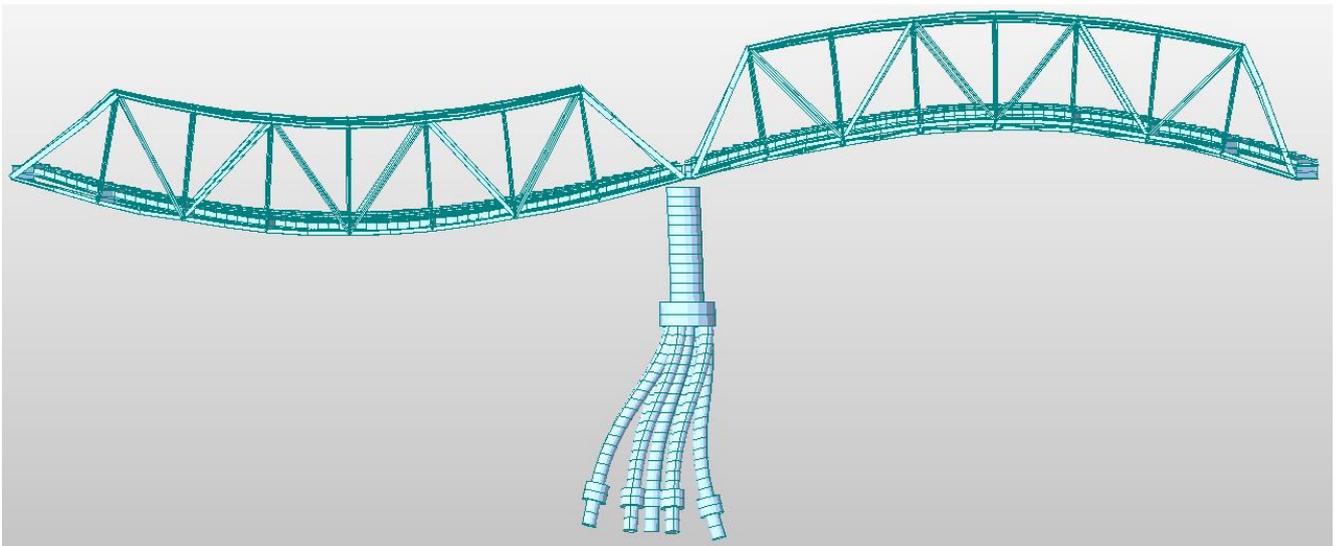


Рисунок 3.8 – Первая форма колебаний опоры и опирающихся на неё пролетных строений с учётом гипотезы о неподвижности опорных частей (третий способ)

Оценка соответствия расчетной модели фактическому динамическому характеру работы конструкции, определенному по результатам 2 главы, производилась по величине конструктивного коэффициента [96], вычисляемого по формуле:

$$K_k = \frac{\nu_e}{\nu_{cal}}, \quad (3.20)$$

где ν_e – измеренное значение собственной частоты колебаний опоры, Гц;

ν_{cal} – расчетное значение собственной частоты колебаний опоры, Гц.

Результаты исследований сведены в таблицу 3.3. Наилучшая сходимость расчетных данных с фактическими, оцениваемая значением конструктивного коэффициента, получена при моделировании пролетных строений с учётом гипотезы о неподвижности опорных частей при свободных колебаниях (третий способ).

Таблица 3.3 – Результаты расчетных исследований по учёту совместной работы опоры с опирающимися на неё пролетными строениями

№ п/п	ν_e , Гц	Способ № 1. Моделирование пролетных строений в виде приложенной массы		Способ № 2. Моделирование пролетных строений с учётом их жесткости (подвижные и неподвижные опорные части)		Способ № 3. Моделирование пролетных строений с учётом их жесткости (гипотеза о неподвижности опорных частей при свободных колебаниях)	
		ν_{cal} , Гц	K_k	ν_{cal} , Гц	K_k	ν_{cal} , Гц	K_k
1	4,4	2,4	1,83	3,8	1,16	4,4	1,00
2	4,2	3,5	1,20	3,0	1,40	4,4	0,95
3	2,4	0,9	2,67	1,2	2,00	2,4	1,00
4	4,9	4,4	1,11	3,3	1,48	4,7	1,04
5	3,5	3,1	1,13	3,2	1,09	3,7	0,95
6	5,6	9,7	0,58	5,0	1,12	5,8	0,97

Таким образом, по результатам проведенного численного эксперимента можно сформулировать следующие требования к математической модели для расчета частот собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания:

- 1) моделирование опоры и опирающихся на неё пролетных строений осуществляется в соответствии с фактическими геометрическими и жесткостными параметрами, установленными по результатам обследования конструкций.
- 2) моделирование массивного фундамента производится объемными конечными элементами.

3) взаимодействие фундамента опоры с грунтом основания моделируются одноузловыми связями. При этом для массивного фундамента жесткости связей равномерно распределяются по контуру фундамента в заданных направлениях.

4) глубина заложения фундамента по контуру принимается равномерной (уровень грунта по контуру фундамента усредняется).

5) моделирование совместной работы опоры с опирающимися на неё пролетными строениями осуществляется с учётом гипотезы о неподвижности опорных частей при свободных колебаниях.

На основании вышеизложенных требований к математической модели для расчёта частот собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания произведена верификация расчетных моделей. Расчетные предпосылки подтверждены сопоставлением расчетных значений частот собственных колебаний с фактическим, полученными по результатам 2 главы. Результаты сравнения расчетных и натурных данных приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчетные и экспериментальные значения частот собственных колебаний опор

№ п/п	Объект	Фактическая частота ν_e , Гц	Расчетная частота ν_{cal} , Гц	Конструктивный коэффициент K
1	2	3	4	5
1	мост М1 (опора О1)	3,2	3,1	1,03
2	мост М2 (опора О1)	6,0	5,7	1,05
3	мост М2 (опора О2)	6,1	5,8	1,05
4	мост М2 (опора О3)	5,6	5,8	0,97
5	мост М3 (опора О1)	3,6	3,6	1,00
6	мост М3 (опора О2)	3,7	3,9	0,95
7	мост М4 (опора О1)	3,2	3,3	0,97
8	мост М4 (опора О2)	3,2	3,0	1,07
9	мост М4 (опора О3)	4,2	4,4	0,95
10	мост М5 (опора О1)	4,4	4,4	1,00
11	мост М6 (опора О1)	4,9	4,7	1,04

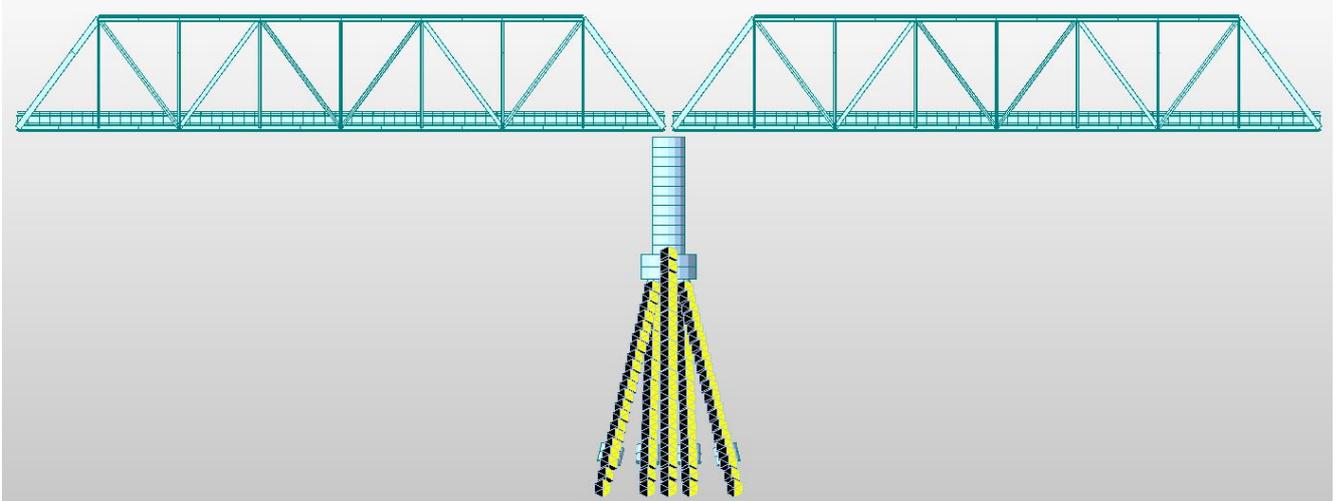
Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5
12	мост М7 (опора О1)	3,6	3,7	0,97
13	мост М7 (опора О2)	3,6	3,7	0,97
14	мост М8 (опора О1)	3,0	3,1	0,97
15	мост М8 (опора О2)	3,1	3,1	1,00
16	мост М8 (опора О3)	3,0	3,1	0,97
17	мост М9 (опора О1)	3,5	3,7	0,95
18	мост М9 (опора О2)	3,5	3,7	0,95
19	мост М9 (опора О3)	3,5	3,6	0,97
20	мост М9 (опора О4)	3,1	3,2	0,97
21	мост М9 (опора О5)	3,1	3,2	0,97
22	мост М9 (опора О6)	3,5	3,5	1,00
23	мост М10 (опора О1)	3,8	3,9	0,97
24	мост М10 (опора О2)	4,0	4,1	0,98
25	мост М11 (опора О1)	3,8	3,7	1,03
26	мост М11 (опора О2)	3,8	3,7	1,03
27	мост М12 (опора О1)	3,6	3,6	1,00
28	мост М12 (опора О2)	3,9	3,9	1,00
29	мост М13 (опора О1)	2,6	2,6	1,00
30	мост М13 (опора О2)	2,8	2,8	1,00
31	мост М14 (опора О1)	2,4	2,5	0,96
32	мост М14 (опора О2)	2,4	2,5	0,96
33	мост М14 (опора О3)	2,8	2,4	1,17
34	мост М14 (опора О4)	2,7	2,6	1,04
35	мост М14 (опора О5)	2,8	2,5	1,12

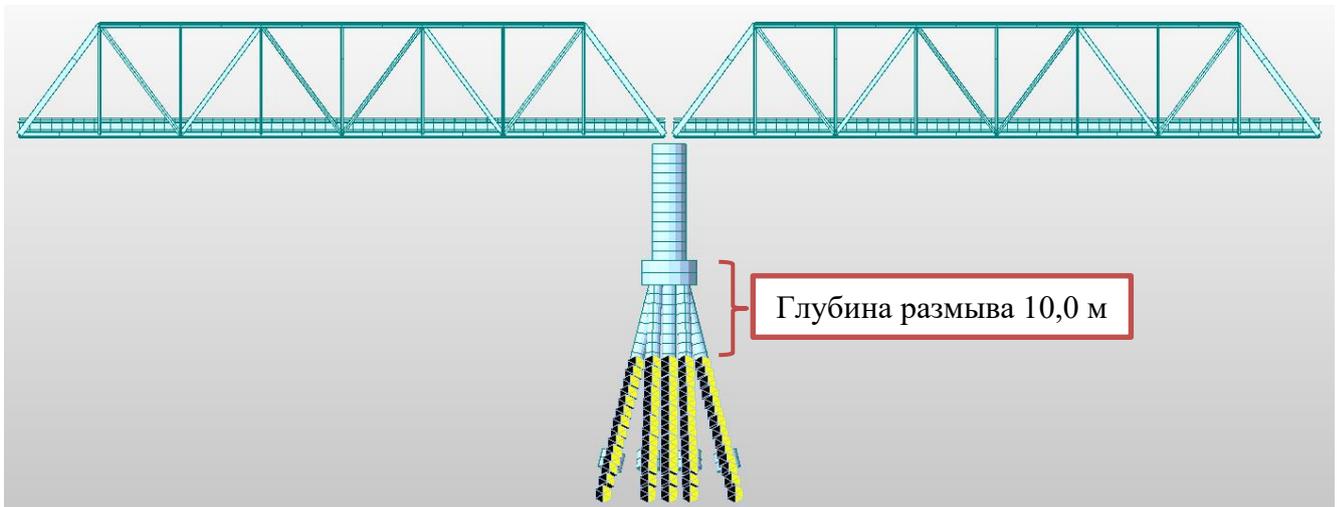
3.3 Расчетные зависимости частот собственных колебаний опор от глубины размыва

После верификации математических моделей для всех 35 объектов выполнены расчетные исследования по выявлению зависимости частоты собственных колебаний природно-техногенной системы от глубины размыва грунта у опоры. Для каждого объекта исследования производятся конечно-элементные расчеты частоты собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания при различной глубине заложения фундамента. Процесс заключается в смещении одноузловых связей, имитирующих взаимодействие фундамента с грунтом, с перерасчетом их жесткостей. Пример конечно-элементной модели, отражающей развитие глубины размыва грунта у опоры, представлен на рисунке 3.9. На рисунках 3.10...3.15 приведены примеры полученных зависимостей частот собственных колебаний от глубины размыва для выборки опор согласно таблице 3.2. Как видно из графиков, при увеличении глубины размыва грунта у опоры происходит уменьшение значения частоты собственных колебаний. При этом изменения частоты происходят на величину, большую, чем точность фиксации частот в 0,1 Гц.

а) размыв отсутствует, средняя отметка грунта у опоры 26,7 м



б) размыв 10,0 м, средняя отметка грунта у опоры 16,7 м



в) размыв 20,0 м, средняя отметка грунта у опоры 6,7 м

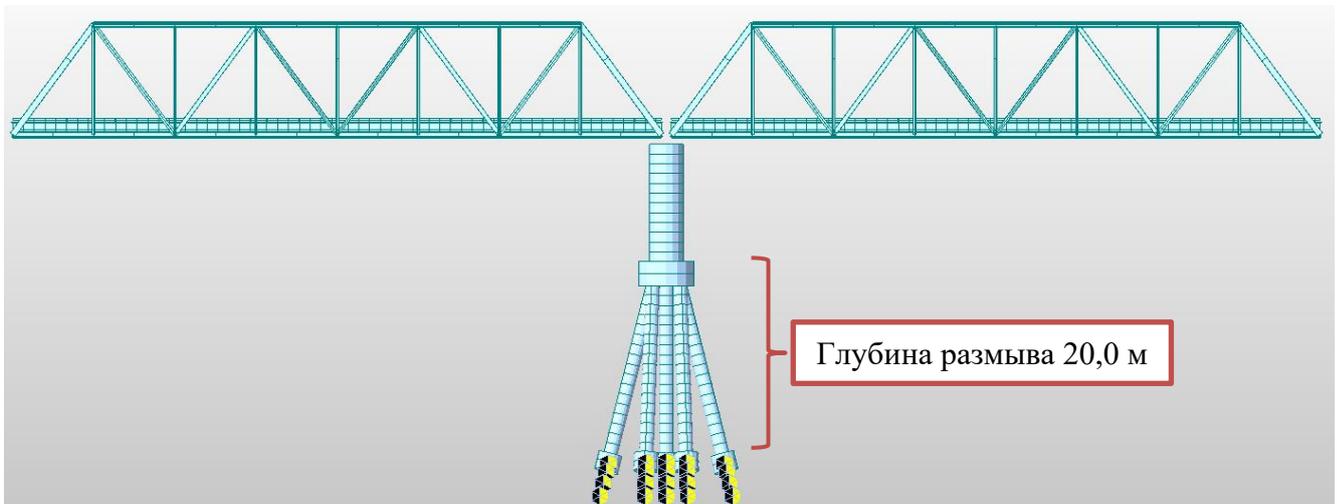


Рисунок 3.9 – Пример конечно-элементной модели опоры О1 моста М14 при различной глубине заложения фундамента

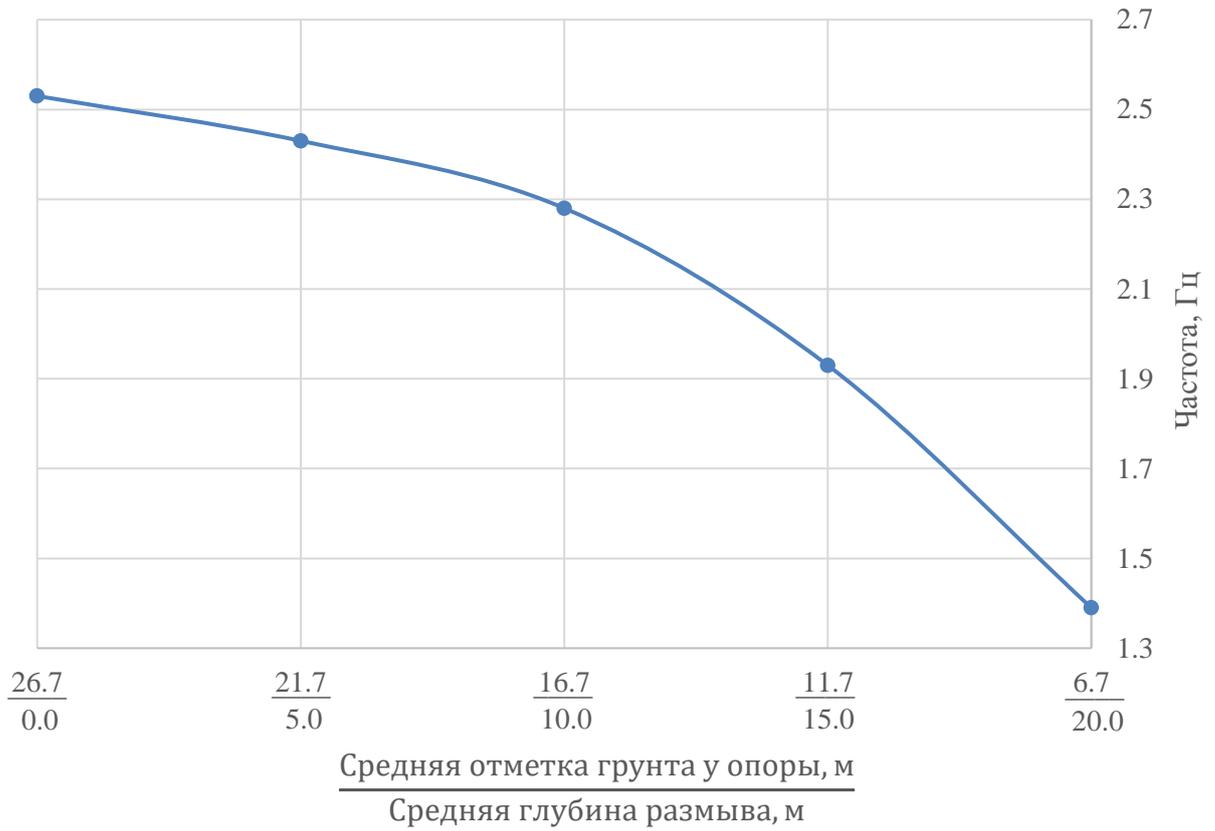


Рисунок 3.10 – График изменения частоты собственных колебаний опоры О1 моста М14 от глубины размыва (первая форма колебаний)



Рисунок 3.11 – График изменения частоты собственных колебаний опоры О1 моста М5 от глубины размыва (первая форма колебаний)



Рисунок 3.12 – График изменения частоты собственных колебаний опоры ОЗ моста М4 от глубины размыва (первая форма колебаний)

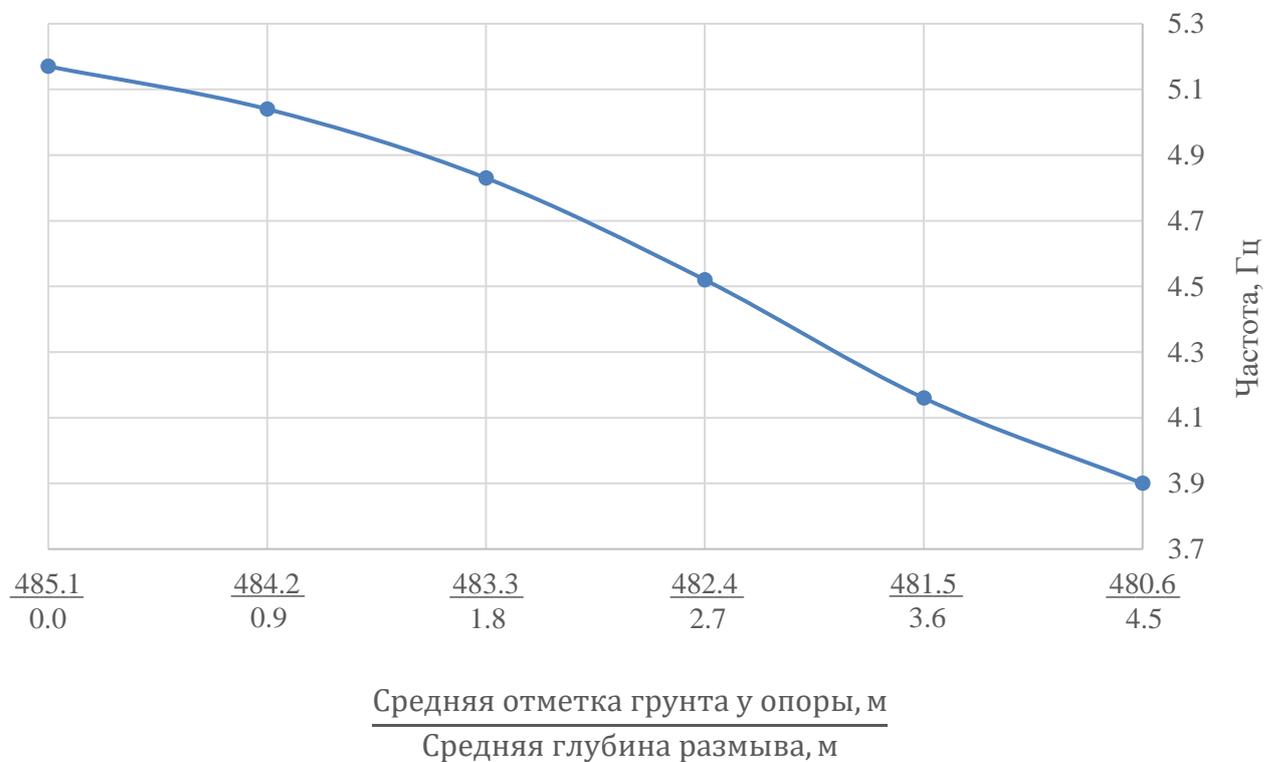


Рисунок 3.13 – График изменения частоты собственных колебаний опоры О1 моста М6 от глубины размыва (первая форма колебаний)

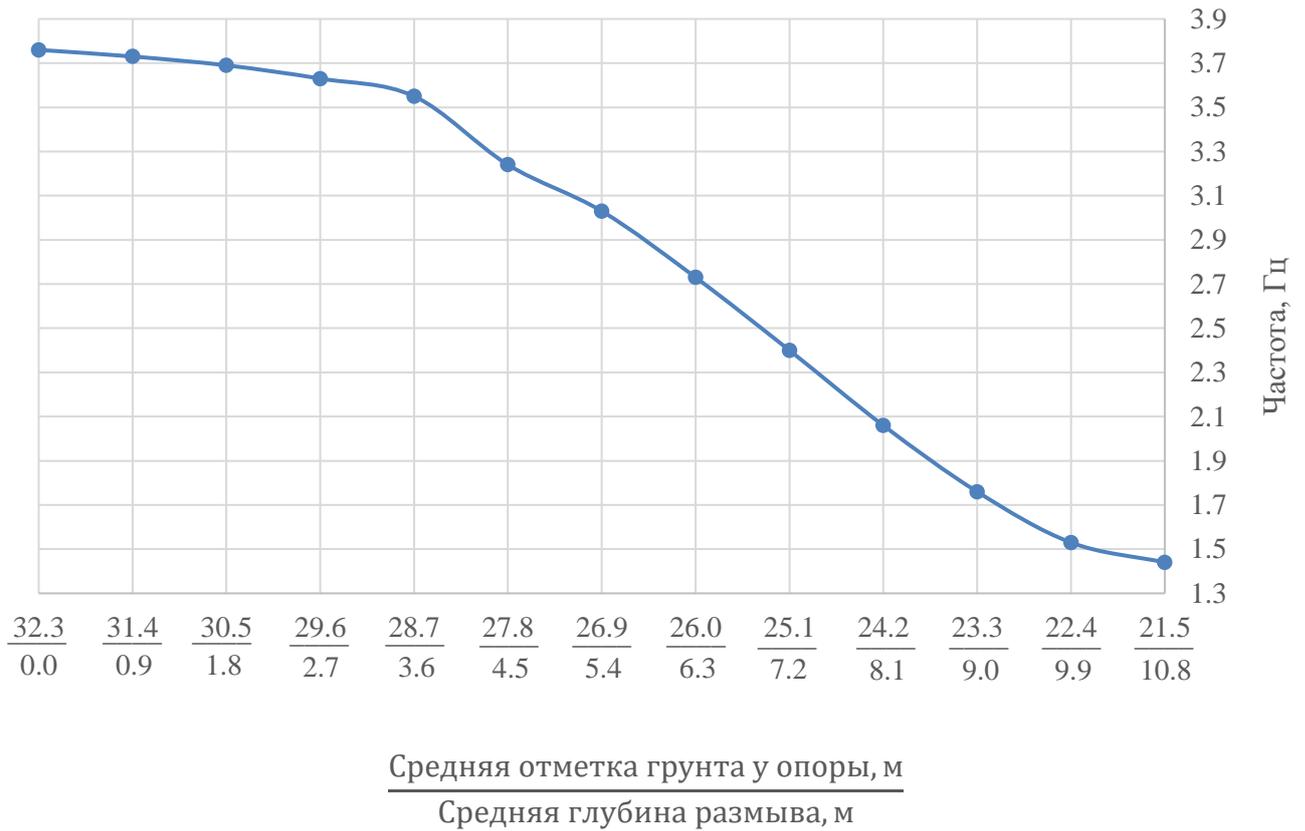


Рисунок 3.14 – График изменения частоты собственных колебаний опоры О1 моста М9 от глубины размыва (первая форма колебаний)

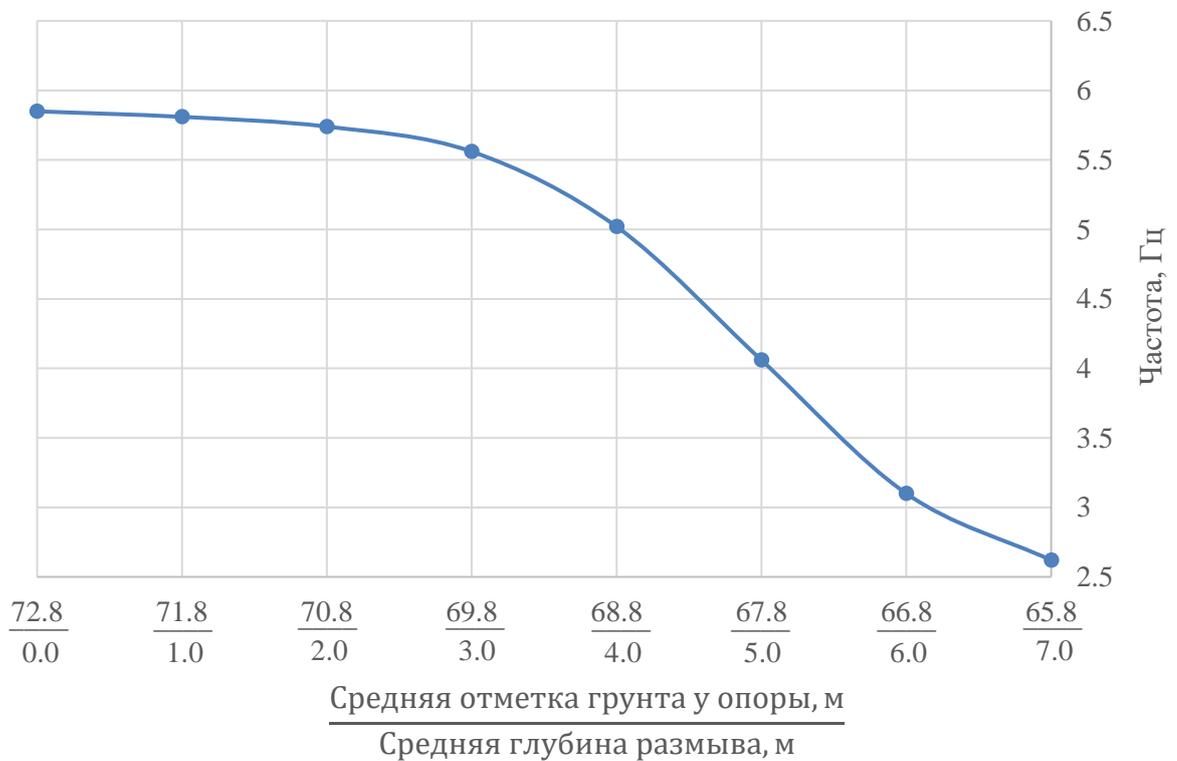


Рисунок 3.15 – График изменения частоты собственных колебаний опоры О3 моста М2 от глубины размыва (первая форма колебаний)

Выводы по главе 3

В результате выполненных исследований обоснованы расчетные предпосылки и допущения при определении частот собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания – основные положения конечно-элементного моделирования, допущение о продольной неподвижности опорных частей при свободных колебаниях. Расчетные предпосылки и возможность их применения подтверждены сравнением расчетных и фактических значений частот собственных колебаний эксплуатируемых опор на сети железных дорог.

Уточнена математическая модель для определения частот собственных колебаний опор при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на неё пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях. Получены расчетные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем от глубины размыва грунта у опор.

Усовершенствованная математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем может быть использована в дальнейшем при мониторинге глубины размыва грунта у опор.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА МОНИТОРИНГА РАЗМЫВА ГРУНТА У ОПОРЫ

Поскольку результаты натурных измерений частот собственных колебаний опор подтвердили соответствие принятых расчетных предпосылок фактической работе конструкций, усовершенствованная математическая модель для определения частот собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с пролетными строениями и грунтом основания может быть использована в дальнейшем для прогнозирования изменения частоты собственных колебаний опоры при развитии размыва. А зная величину проектной глубины размыва, можно определить расчетные граничные значения частот собственных колебаний, при достижении которых требуется принятие эксплуатационных мер. В итоге предлагаемый алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опор по частотам собственных колебаний позволит усовершенствовать способ мониторинга размывов грунта у опор железнодорожных мостов.

4.1 Алгоритм контроля глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний

4.1.1 Определение фактической частоты собственных колебаний опоры и глубины заложения фундамента

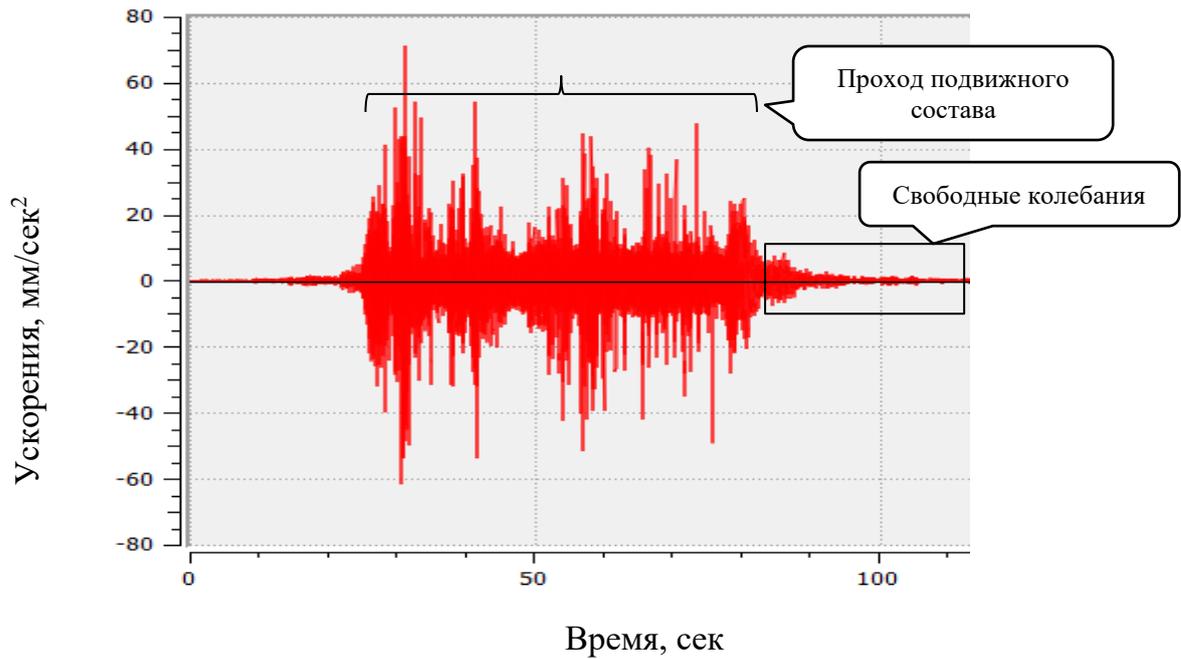
Для определения фактического динамического характера работы природно-техногенной системы, состоящей из опоры, грунта основания и опирающихся на опору пролетных строений, проводится первичная вибродиагностика, заключающаяся в фиксации ускорений верха опоры при колебаниях при проходе обращающейся по мосту нагрузки. Ускорения колебаний измеряются вибродатчиками-акселерометрами, жёстко устанавливаемыми в центре оголовка опоры. Колебания верха опоры фиксируются в продольном направлении моста. Для обеспечения достоверности получаемых данных опора выводится из

равновесия не менее трёх раз (не менее трёх проездов подвижных составов по мосту). Длительность записи должна включать участок до полного затухания колебаний после прохода подвижного состава.

По результатам измерений производится обработка виброграммы ускорений колебаний верха опоры. Обработка дискретного сигнала заключается в применении быстрого преобразования Фурье и получении графика спектральной плотности мощности - спектра частот. Для исключения влияния массы подвижного состава на частоту колебаний, а также для исключения фиксации частот вынужденных колебаний анализ виброграммы осуществляется на характерном участке свободных колебаний после прохода подвижной нагрузки по мосту (см. рисунок 4.1а). По результатам обработки фиксируется низшая частота собственных колебаний в продольном направлении, обладающая максимальной мощностью (см. рисунок 4.1б). Таким образом, по результатам первичной вибродиагностики фиксируется условно «начальное» значение частоты собственных колебаний опоры для последующего мониторинга.

Помимо этого, для последующей верификации расчетной модели определяется фактический уровень грунта у опоры, которому соответствует зафиксированное «начальное» значение частоты собственных колебаний опоры. Фактические отметки дна вокруг опоры определяются по результатам промеров глубин методами прямых измерений, описанными в главе 1 и в существующих нормативных документах [38-41]. В качестве оборудования для измерения глубин в зависимости от условий измерения и параметров реки могут быть применены эхолоты, гидролокаторы или традиционные средства (рейки, наметки, гидрометрические штанги, ручные и механические лоты и т.д.).

а) определение на виброграмме участка свободных колебаний



б) выделение из спектра низшей частоты собственных колебаний в продольном направлении, обладающей максимальной мощностью

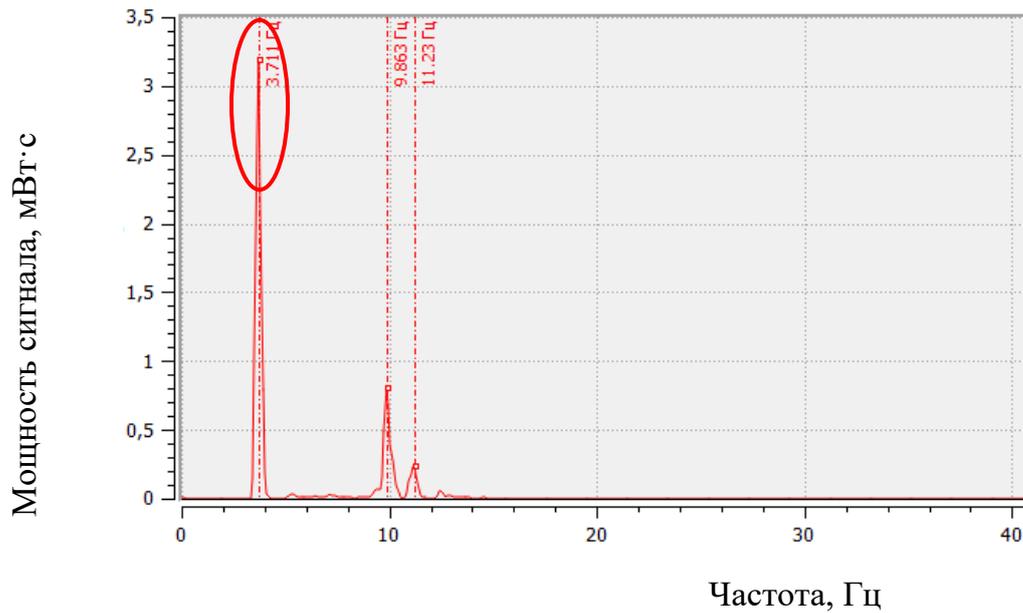


Рисунок 4.1 – Обработка первичного сигнала по результатам вибродиагностики

4.1.2 Моделирование природно-техногенной системы

Результаты, полученные с помощью уточненной математической модели для определения частот собственных колебаний опоры с учётом опирающихся на неё пролетных строений и грунта основания, удовлетворительно согласуются с фактической работой конструкции, определенной по результатам натурных измерений (см. таблицу 3.4). Поэтому принятые расчетные предпосылки, описанные в главе 3, верны и могут быть применены при составлении конечно-элементной модели для прогнозирования изменения частоты собственных колебаний опоры при развитии глубины размыва:

- допускается принимать, что глубина заложения фундамента равномерная и определяется средним значением уровня грунта по контуру опоры;
- допускается принимать, что при свободных колебаниях конструкции опорные части в продольном направлении работают как неподвижные (сила трения в опорных частях больше активного горизонтального воздействия).

Моделирование опоры и опирающихся на неё пролетных строений следует выполнять в соответствии с их фактическими геометрическими и жесткостными параметрами. Пролетные строения, тело опоры и свайный фундамент рекомендуется моделировать стержневыми конечными элементами с шестью степенями свободы в узле, массивный фундамент – объемными конечными элементами. Опорные части, обеспечивающие совместную работу пролетных строений и опоры, моделируются двухузловыми связями (см. рисунок 3.5) с учетом гипотезы о продольной неподвижности опорных частей при свободных колебаниях. К расчетной модели прикладываются фактические постоянные нагрузки: нагрузки от собственного веса опоры, пролетных строений, мостового полотна и иных конструкций (например, смотровых приспособлений, коммуникаций и т.д.).

Взаимодействие фундамента опоры с грунтом основания моделируется одноузловыми связями. Жесткости одноузловых связей вычисляются по формулам (3.12) - (3.19), приведенным в главе 3. При этом для массивного фундамента,

смоделированного объемными элементами, жесткости связей рекомендуется равномерно распределять по контуру фундамента в заданных направлениях (см. п.4.2.2. и рисунок 4.17).

4.1.3 Прогнозирование изменения частоты собственных колебаний природно-техногенной системы при развитии глубины размыва грунта у опоры

Для подтверждения того, что расчетная модель отражает фактическую работу конструкции, определенную при первичной вибродиагностике, в первую очередь производится расчет частоты собственных колебаний опоры с учётом опирающихся на неё пролетных строений при среднем уровне грунта, зафиксированном при натурных измерениях. Также рекомендуется выполнить повторную верификацию модели при той повторной вибродиагностике, по результатам которой частота собственных колебаний изменится относительно первичных измерений.

После верификации расчетной модели производится определение частот собственных колебаний при различной глубине размыва грунта у опоры. Процесс заключается в смещении одноузловых связей, имитирующих взаимодействие фундамента с грунтом, с перерасчетом их жесткостей. Наибольшая глубина заложения фундамента принимается в соответствии с проектной документацией, наименьшая – в уровне подошвы фундамента. Шаг смещения уровня грунта для расчетов рекомендуется принимать около 1 м для более точного построения графика зависимости частоты собственных колебаний от глубины размыва. В отдельных случаях при глубине фундамента более 10 м шаг смещения допускается увеличивать, при этом контролируя плавность очертания графика. Построение графика должно осуществляться по пяти и более точкам, что необходимо учесть при выборе шага смещения уровня грунта. По результатам расчетов строится график зависимости частоты собственных колебаний природно-техногенной системы от глубины размыва (рисунок 4.2), тем самым выполняется

прогнозирование изменения зафиксированной при первичной вибродиагностике частоты собственных колебаний опоры при развитии глубины размыва.

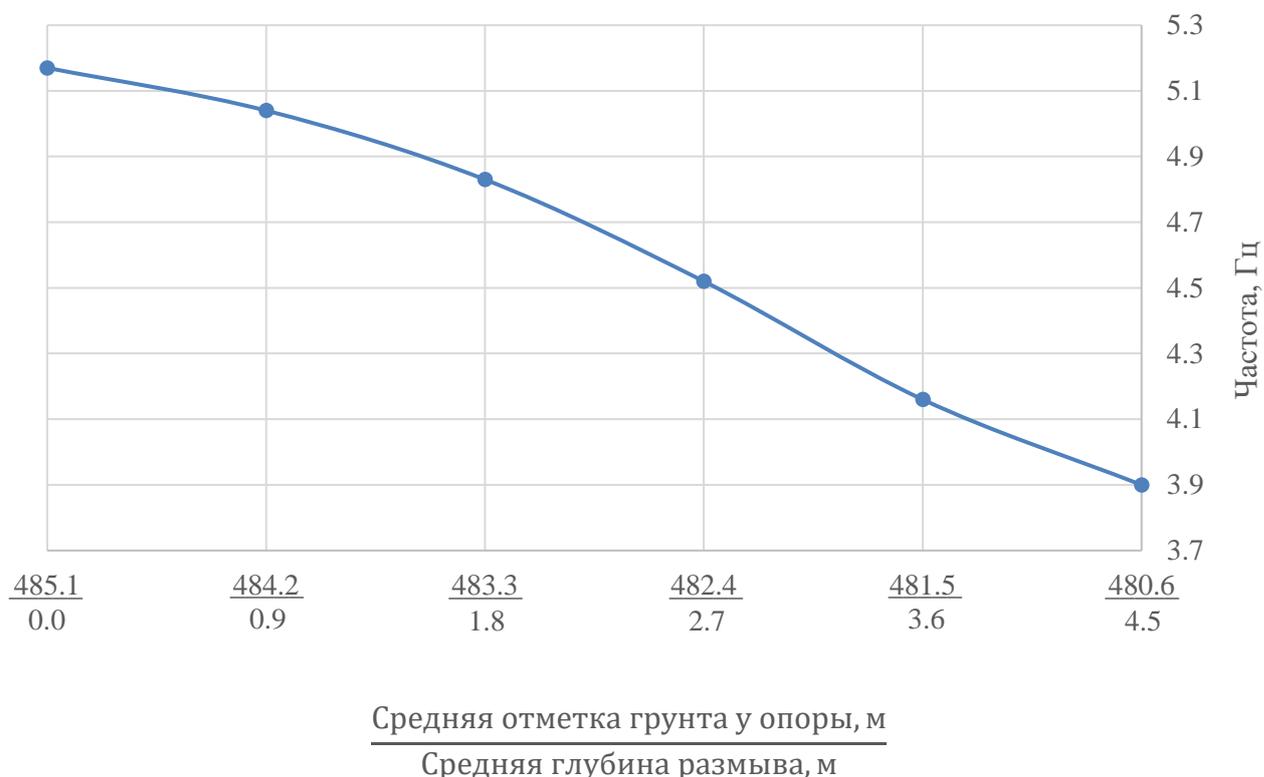


Рисунок 4.2 – Пример графика изменения частоты собственных колебаний опоры от глубины размыва

4.1.4 Определение граничных значений частоты собственных колебаний и условий дальнейшей эксплуатации

После построения расчетной зависимости частоты собственных колебаний опоры от глубины размыва определяются граничные значения частот, при достижении которых требуется принятие эксплуатационных мер. В качестве граничного значения рекомендуется назначать расчетное значение частоты собственных колебаний, соответствующее проектной глубине размыва грунта у опоры. В качестве проектного размыва подразумевается суммарная величина (h_p), складывающаяся из общего и местного размывов. Значение проектного размыва принимается согласно имеющейся на сооружение документации. При отсутствии

необходимых данных в документации требуется выполнить расчеты общего, местного и суммарного размывов по формулам, приведенным в главе 1.

При последующей вибродиагностике в рамках установленной периодичности производятся контрольные измерения частоты собственных колебаний. Если измеренная частота (ν_i) оказалась больше или равна частоте, соответствующей проектному уровню размыва ($\nu_{\text{проект}}$) с учетом точности измерительного оборудования, то принятие экстренных мер по устранению дефекта не требуется. Предполагается, что размыв до проектного уровня не является критичным, работа конструкции соответствует проектной. Если же измеренная частота (ν_i) оказалась меньше частоты, вычисленной при проектном уровне размыва ($\nu_{\text{проект}}$) с учетом точности измерительного оборудования, то требуются проведение более детального обследования подводной части опоры и оценка влияния размыва на грузоподъемность, по результатам которых выносятся рекомендации по дальнейшей эксплуатации сооружения.

Измерения частоты собственных колебаний с целью мониторинга размыва грунта у опоры рекомендуется проводить не менее 2 раз в год: до и после прохождения паводка. В особых случаях, при выявлении стремительного развития размыва, рекомендуется увеличение периодичности измерений вплоть до постоянного мониторинга.

4.1.5 Алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний

Разработанный алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний состоит из последовательности следующих действий, представленных на рисунке 4.3 (цветом выделены позиции, включающие предложенные автором уточнения). Алгоритм представляет собой уточнение традиционного подхода к мониторингу технического состояния конструкций, заключающегося в периодическом измерении контролируемого параметра и его

сравнении с расчетными граничными значениями. Уточнения, сделанные автором, заключаются в предложенном способе моделирования природно-техногенной системы, определении расчётных зависимостей частоты собственных колебаний этой системы от глубины размыва грунта у опоры, определении граничных значений частот и в уточнении критерия обеспечения проектной работы сооружения.

Область применения разработанного алгоритма ограничивается наличием документации на объект и сведений в ней о конструкции невидимой части опоры и геологическом строении основания. При отсутствии одного из этих данных прогнозирование изменения частоты собственных колебаний при развитии размыва невозможно. В этом случае предлагается выполнять оценку изменения частоты собственных колебаний опоры относительно «начального» значения, полученного при первичной вибродиагностике. Если частота собственных колебаний, полученная при повторных измерениях в рамках установленной периодичности (ν_i), оказалась больше либо равна частоте при первичном измерении (ν_n) с учетом точности измерительного оборудования, то считается, что размыв не увеличился, либо увеличился незначительно, что не снижает грузоподъемность сооружения. В этом случае принятие каких-либо эксплуатационных мер не требуется. Если же частота собственных колебаний (ν_i) оказалась меньше «начального» значения (ν_n) с учётом точности измерительного оборудования, то требуется проведение более детального обследования подводной части опоры и оценка влияния размыва на грузоподъемность. Описанный алгоритм контроля размыва грунта при отсутствии данных о конструкции невидимой части опоры и геологическом строении основания приведен на рисунке 4.4.

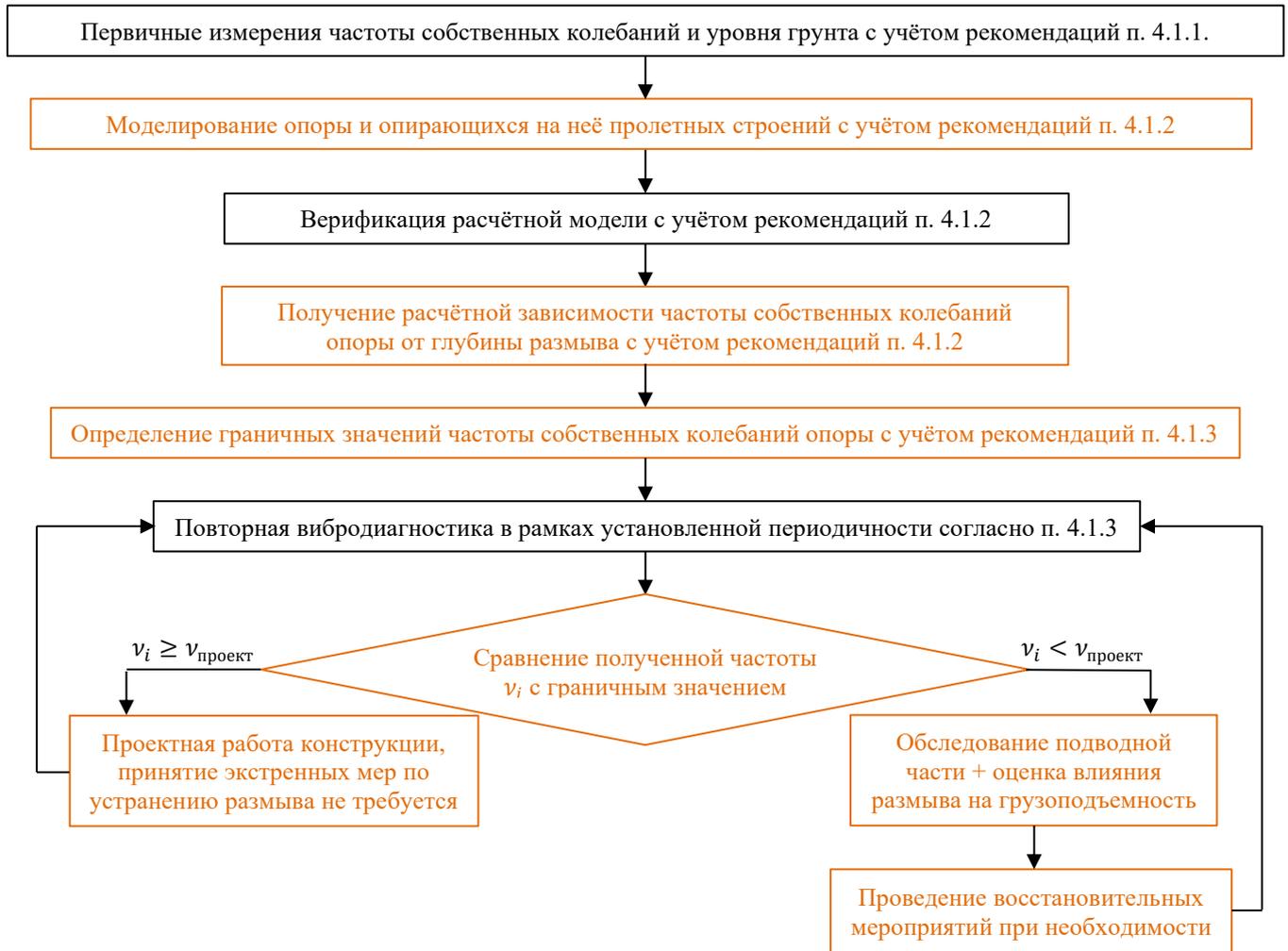


Рисунок 4.3 – Алгоритм контроля глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний



Рисунок 4.4 – Алгоритм контроля размыва грунта при отсутствии данных о конструкции невидимой части опоры и геологическом строении основания

4.2 Применение усовершенствованного способа обнаружения и контроля размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний

Разработанный алгоритм применен на 13 железнодорожных мостах и одном совмещенном мосту (всего 35 русловых опор). Ниже приведены примеры его применения для характерных конструкций – свайной опоры и опоры на массивном фундаменте.

4.2.1 Пример применения усовершенствованного способа для свайной опоры железнодорожного моста через реку Н.

В рамках работ по комплексному подводно-техническому обследованию опор железнодорожных мостов, выполненных специалистами СибНИИ мостов СГУПС, проведен контроль глубины размыва грунта у свайной опоры моста через р. Н. по частотам собственных колебаний с применением разработанного алгоритма. Исследуемая русловая опора – массивная монолитная опора под два пути на низком свайном ростверке из 15 железобетонных свай диаметром 0,8 м. На опору через подвижные и неподвижные шарово-сегментные опорные части опираются балочные разрезные металлические пролетные строения. Русло реки сложено размываемым галечниковым грунтом, в основании фундамента залегают мигматиты – скальные неразмываемые грунты.

Вибродиагностика выполнена с учётом рекомендаций п. 4.1.1. На оголовке опоры смонтирован металлический столик, на который были установлены датчики-акселерометры измерительного комплекса «Тензор-МС». Для опоры выполнено шесть записей прохода груженых составов по мосту. После прохода подвижного состава зафиксированы установившиеся свободные колебания верха опоры в горизонтальной плоскости в продольном и поперечном направлениях, а также в вертикальной плоскости. Пример установки измерительной системы на русловую опору показан на рисунке 4.5.

По результатам измерений получены виброграммы ускорений верха опоры при колебаниях, пример которых приведен на рисунке 4.6. Обработка виброграмм выполнена на характерном участке свободных колебаний после прохода подвижной нагрузки по мосту с применением специального программного обеспечения «Тензор МС». В результате обработки сигнала получены графики спектральной плотности мощности, представленные на рисунке 4.7, выделена низшая частота собственных колебаний в продольном направлении моста, обладающая максимальной мощностью. Таким образом, по результатам вибродиагностики зафиксировано «начальное» значение частоты собственных колебаний опоры, равное 3,2 Гц, для последующего мониторинга.

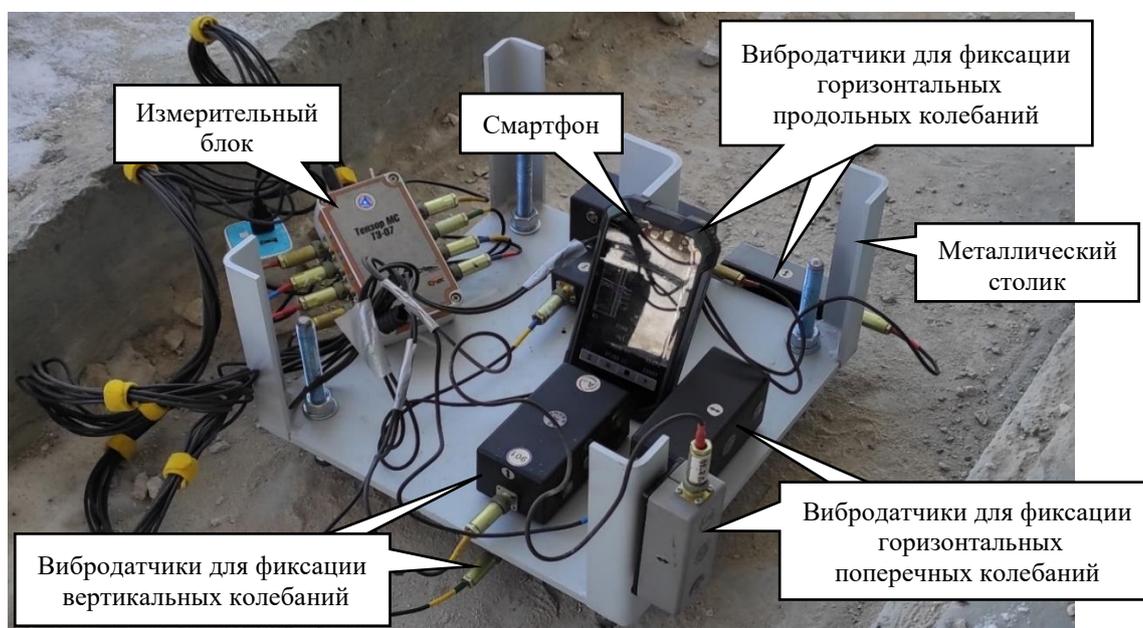


Рисунок 4.5 – Общий вид системы «Тензор МС», установленной на опоре

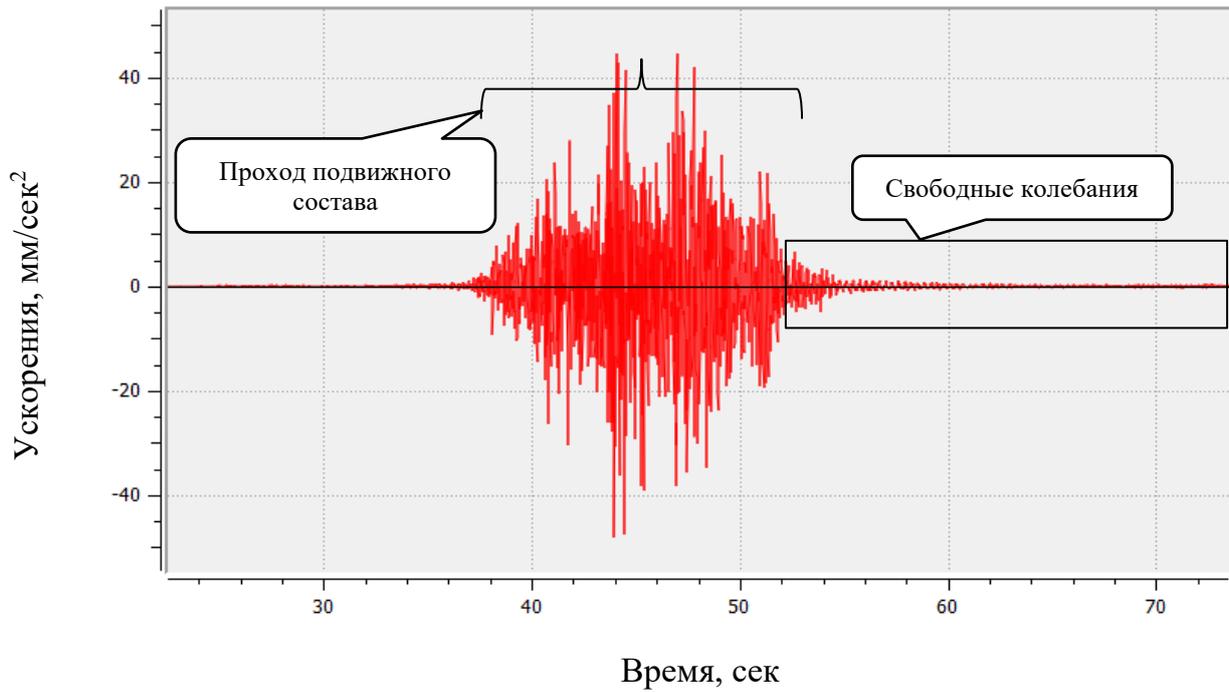


Рисунок 4.6 – Пример виброграмм ускорений верха опоры при колебаниях

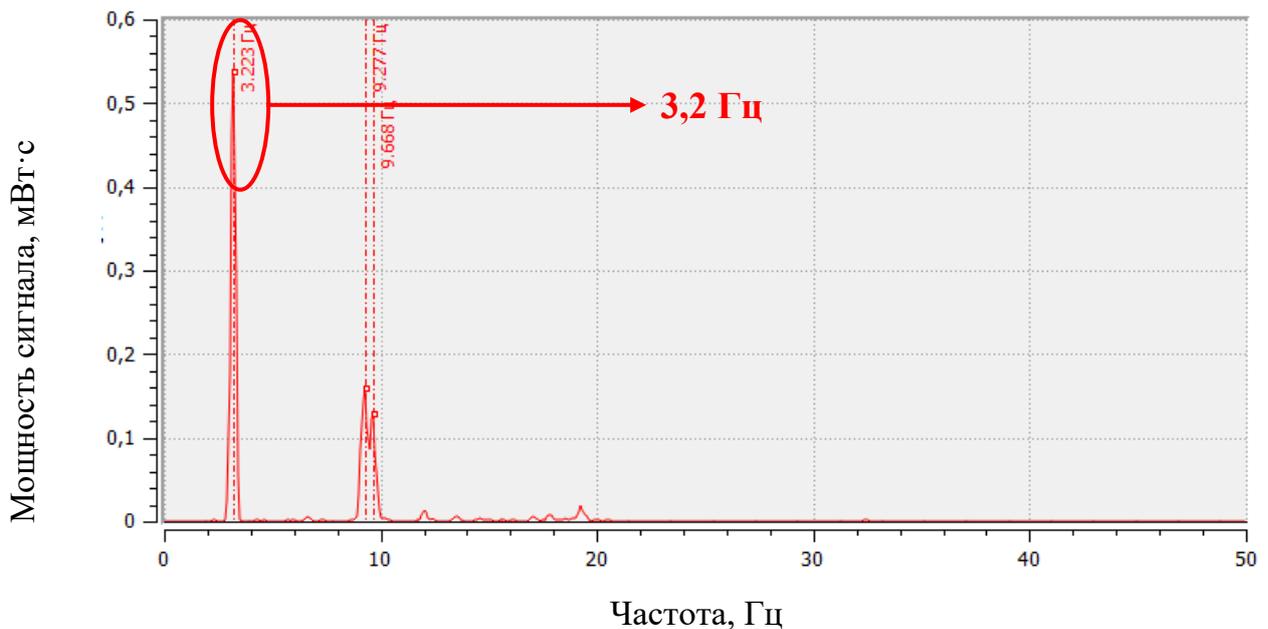


Рисунок 4.7 – Пример спектров частот колебаний верха опоры

Уровень грунта, соответствующий зафиксированной частоте собственных колебаний, определяли промером глубин с применением гидрологического комплекса. Кроме того, глубину русла около опоры фиксировали при помощи гидролокатора кругового обзора.

На основании промеров был получен топографический план и трехмерная поверхность дна, приведенные на рисунках 4.8 и 4.9. В соответствии с Инструкцией

[38], были построены лучевые створы по периметру русловой опоры. Лучевые створы с отметками дна приведены на рисунке 4.10. По результатам измерений средняя отметка дна по контуру фундамента составила 493,8 м.

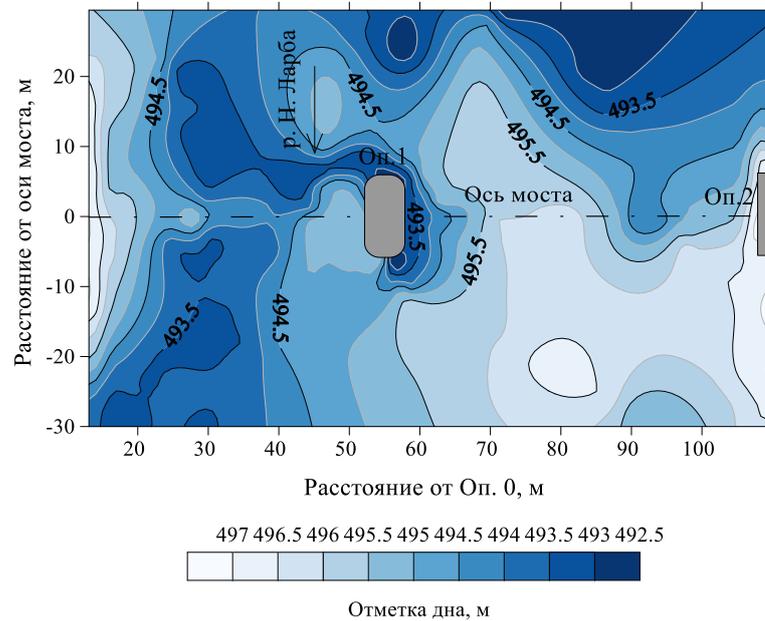


Рисунок 4.8 – Топографический план рельефа дна реки Н на участке расположения моста

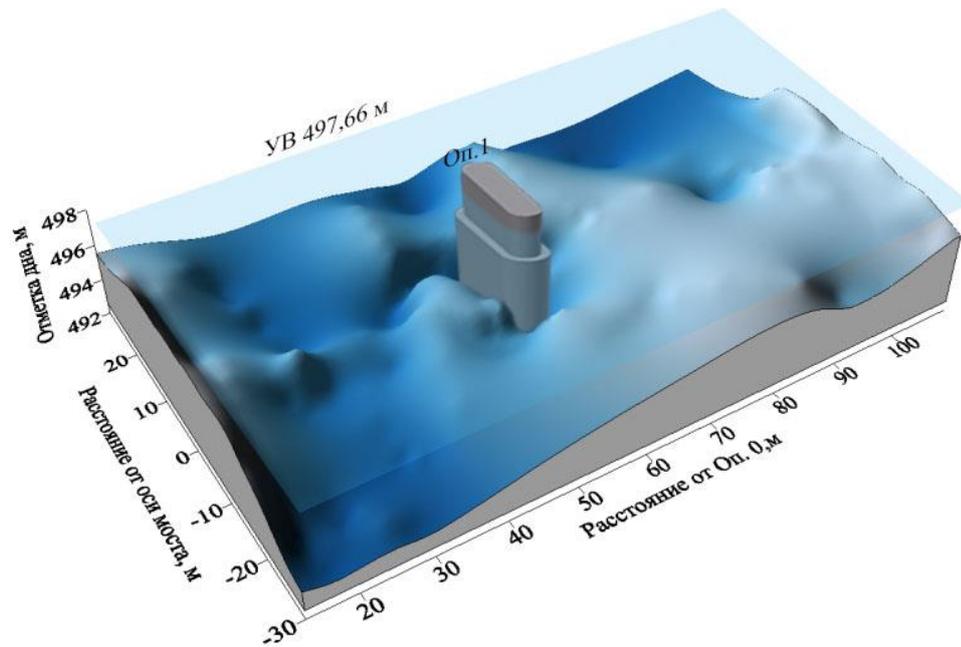


Рисунок 4.9– Трехмерная поверхность дна реки Н. на участке расположения моста

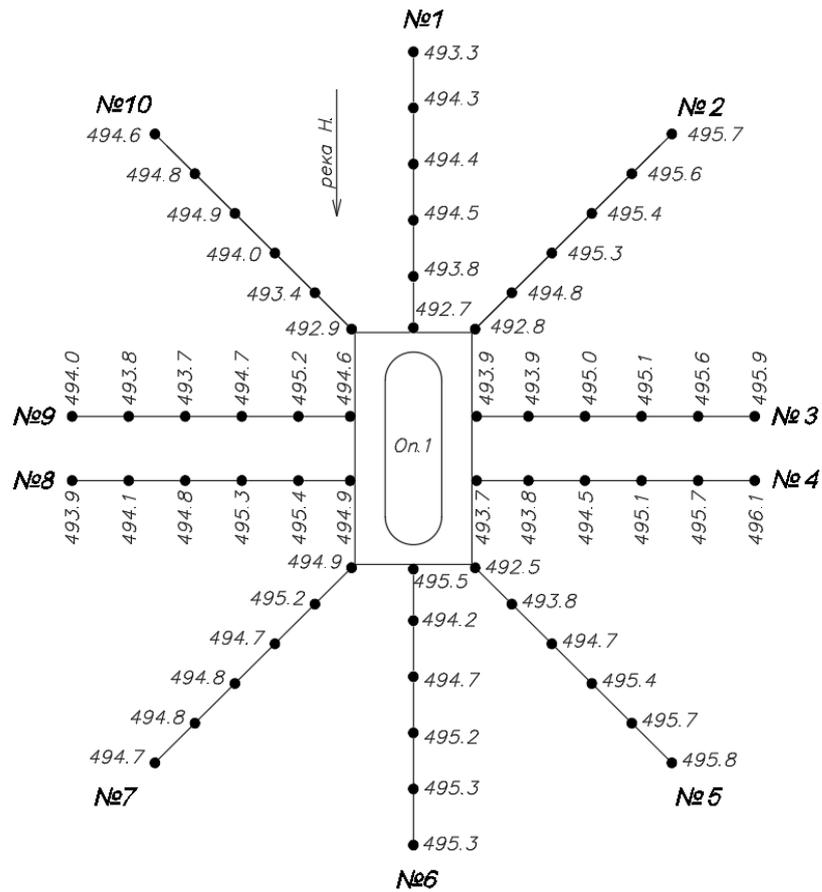


Рисунок 4.10 – Отметки дна вокруг опоры

Моделирование опоры и опирающихся на неё пролетных строений выполнено с учётом рекомендаций п. 4.1.2. Пролетные строения, тело опоры и свайный фундамент выполнены стержневыми конечными элементами с шестью степенями свободы в узле. Опорные части, обеспечивающие совместную работу пролетных строений и опоры, смоделированы двухузловыми связями с учетом гипотезы о продольной неподвижности опорных частей при свободных колебаниях. К расчетной модели приложены фактические постоянные нагрузки: нагрузки от собственного веса опоры, пролетных строений, мостового полотна и смотровых приспособлений. Взаимодействие фундамента опоры с грунтом основания смоделировано одноузловыми связями. Жесткости одноузловых связей вычислены по формулам (3.12) - (3.19), приведенным в главе 3. Общий вид модели с заданными одноузловыми связями и приложенной нагрузкой приведен на рисунке 4.11.

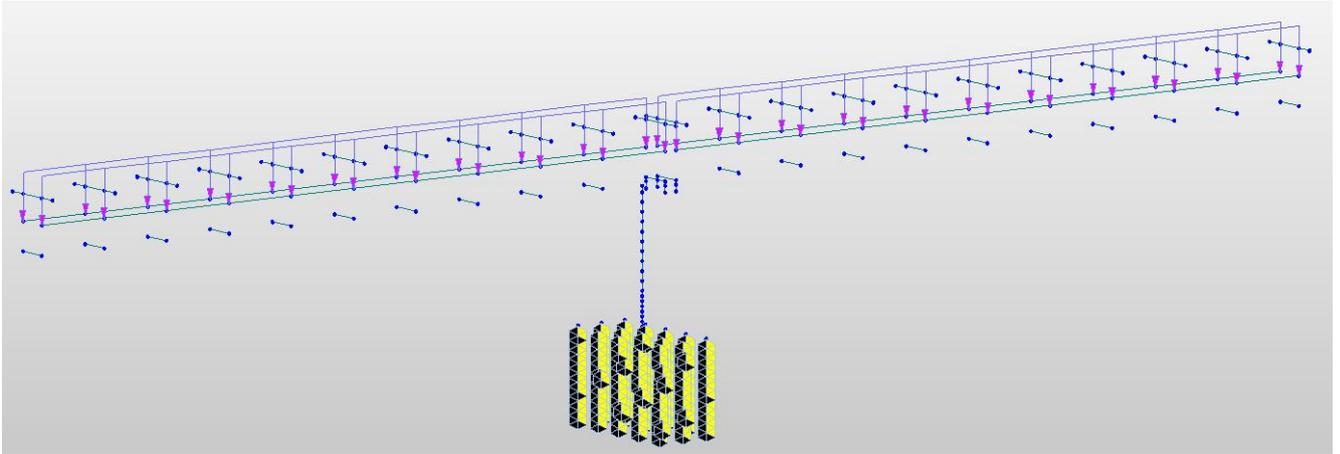


Рисунок 4.11 – Общий вид конечно-элементной модели опоры и опирающихся на неё пролетных строений

Для подтверждения того, что расчетная модель отражает фактическую работу конструкции, определенную при вибродиагностике, произведен расчет частот собственных колебаний при фактически зафиксированном уровне грунта 493,8 м. По результатам расчетов частота собственных колебаний по первой форме (колебание опоры в продольном направлении, пролетных строений – в вертикальной плоскости), представленной на рисунке 4.12, составила 3,1 Гц, что удовлетворительно согласуется с фактически зафиксированной частотой 3,2 Гц.

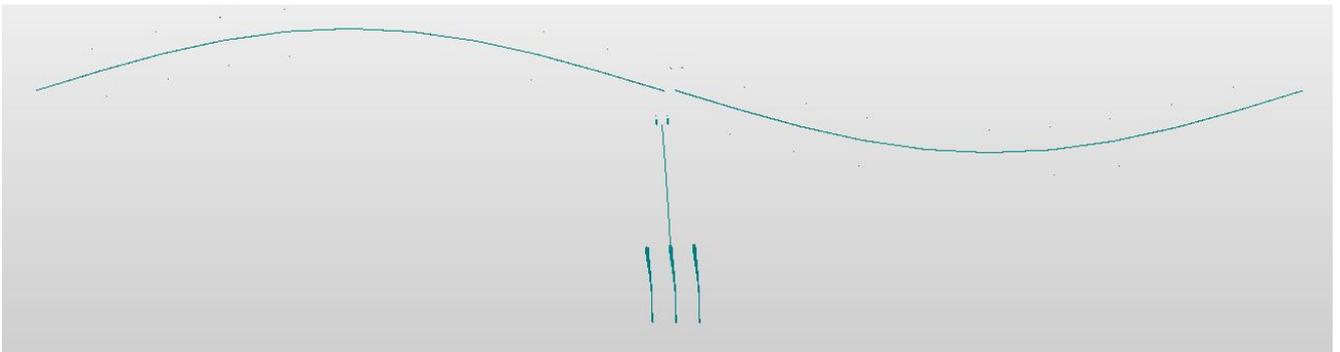


Рисунок 4.12 – Первая форма колебаний опоры и опирающихся на неё пролетных строений

После верификации расчетной модели выполнены расчеты частот собственных колебаний при различной глубине заложения фундамента. Наибольшая глубина заложения фундамента принята в соответствии с проектной документацией, отметка грунта равна 494,1 м. Шаг смещения уровня грунта принят 0,7 м в соответствии с конечно-элементной разбивкой для удобства перерасчета

жесткостей одноузловых связей. Исходя из этого, наименьший уровень грунта получен на 0,5 м выше подошвы фундамента и равен 487,8 м.

По результатам расчетов построен график зависимости частоты собственных колебаний опоры от глубины размыва, который представлен на рисунке 4.13. На график нанесены частота собственных колебаний, зафиксированная при натуральных измерениях, и соответствующий ей уровень грунта.

Ввиду того, что в проектной документации отсутствуют данные о расчетных значениях глубин размывов, выполнен расчет максимальных значений общего и местного размывов грунта у русловой опоры для назначения граничных значений частоты собственных колебаний. Расчет глубин общего (h_o), местного (h_m) и суммарного (h_p) размывов выполнен согласно методике, изложенной в главе 1 и [2, 34]. Результаты расчетов при обеспеченности $p=1\%$ и $0,33\%$ представлены в таблице 4.1. Отметка дна после местного размыва расположена в толще скального грунта, поэтому расчетный размыв (h_p) принят до границы мигматита.

Таблица 4.1 – Расчетный размыв грунта у опоры

$p, \%$	$h_o, \text{ м}$	$h_m, \text{ м}$	$h_p, \text{ м}$	Отметка дна у опоры после общего размыва $H_o, \text{ м}$	Отметка дна у опоры после расчетного размыва (до мигматита) $H_p, \text{ м}$
1	0,30	3,78	4,08	493,80	490,02
0,33	0,33	3,75		493,77	

Граничное значение частоты, соответствующее отметке грунта у опоры 490,02 м, по результатам расчетов составило 1,6 Гц. Граничное значение нанесено на график, представленный на рисунке 4.13, красным цветом.

Полученный график может быть использован при последующем мониторинге. Если при последующей вибродиагностике частота собственных колебаний окажется больше или равна 1,6 Гц, то принятие экстренных мер по устранению дефекта не требуются. Размыв до проектного уровня не является критичным, работа конструкции соответствует проектной. Если же измеренная частота окажется меньше 1,6 Гц, то необходима организация детального обследования подводной части опоры и оценка влияния размыва на грузоподъемность.



Рисунок 4.13 – График изменения частоты собственных колебаний опоры в зависимости от глубины размыва

На данный момент повторные измерения для этого объекта не проводились, поэтому для отображения полного цикла разработанного алгоритма далее приведен пример для другого эксплуатируемого объекта.

4.2.2 Пример применения усовершенствованного способа для опоры на массивном фундаменте железнодорожного моста через реку М.

На данном объекте в русле реки расположены две однотипные опоры на массивном фундаменте. На опоры через подвижные и неподвижные опорные части опираются ферменные типовые пролетные строения. Русло реки сложено размываемым галечниковым грунтом, в основании фундамента залегают конгломераты – скальные неразмываемые грунты.

Первые измерения, включающие в себя вибродиагностику и определение фактического уровня грунта у опор, проведены в сентябре 2021 года. Измерения

выполнены аналогична примеру, описанному в п. 4.2.1. В результате получены «начальные» значения частот собственных колебаний, равные 3,9 Гц для опоры № 1 и 3,8 Гц для опоры № 2. Осредненный уровень грунта, соответствующий зафиксированным значениям частот, равен 220,5 м для обеих опор.

Конечно-элементные модели опор выполнены согласно рекомендациям п. 4.1.2. В данном случае, помимо массивного фундамента, объемными конечными элементами смоделировано и тело опоры, имеющее ледорезную грань. Общий вид конечно-элементной модели представлен на рисунке 4.14.

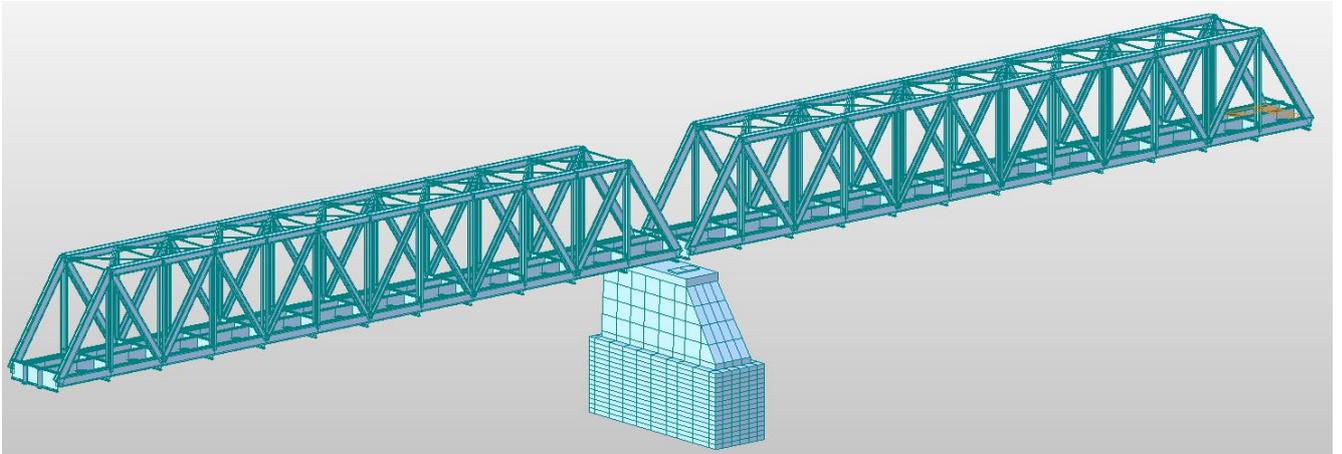


Рисунок 4.14 – Общий вид конечно-элементной модели русловой опоры и опирающихся на неё пролетных строений

Взаимодействие фундамента опоры с грунтом основания смоделировано одноузловыми связями. Жесткости одноузловых связей, вычисленные согласно главе 3, равномерно распределены по контуру фундамента в заданных направлениях: жесткость в продольном направлении моста (k_{xi}) распределена на 22 узла конечно-элементной сетки, жесткость в поперечном направлении (k_{yi}) на 14 узлов. Пример распределения жесткостей приведен на рисунке 4.15.

По верифицированной модели согласно вышеизложенным рекомендациям произведены расчеты и получен график изменения частот собственных колебаний природно-техногенной системы при развитии размыва. Граничные значения назначены в соответствии с имеющимися в проектной документации данными о расчетном размыве до скального грунта. Полученные графики представлены на рисунках 4.16 и 4.17.

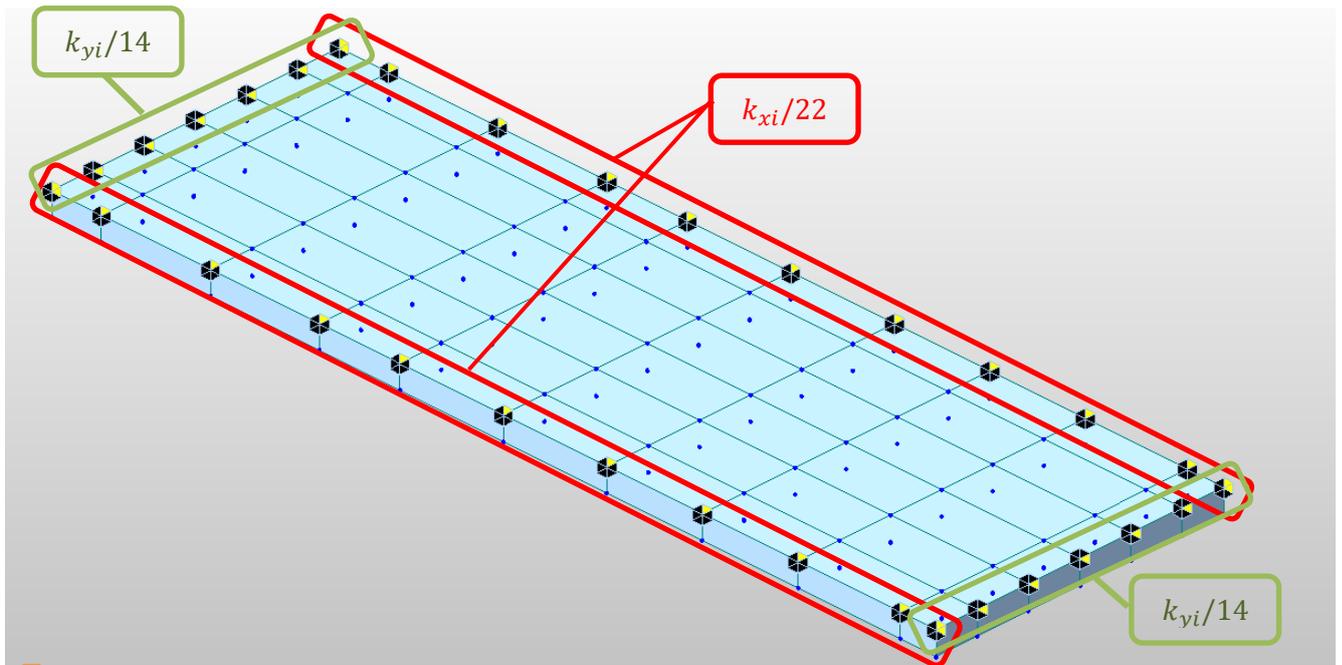


Рисунок 4.15 – Распределение жесткостей одноузловых связей по контуру фрагмента фундамента

В ноябре 2022 г. выполнена повторная вибродиагностика, по результатам которой для опоры № 1 зафиксировано снижение частоты собственных колебаний до 3,6 Гц, что согласно графику, изображенному на рисунке 4.16, соответствует размыву до отметки 217,8 м. Но поскольку измеренная частота всё еще остается больше частоты, соответствующей проектному уровню размыва, то принятие экстренных мер по устранению размыва не требуется, рекомендуется продолжение мониторинга размыва грунта у опоры. Для аналогичной по конструкции опоры № 2 зафиксировано увеличение частоты собственных колебаний на величину 0,1 Гц, что свидетельствует либо о незначительном намыве грунта у опоры, либо об отсутствии изменений по сравнению с прошлым годом (отклонение частоты может быть вызвано точностью измерительного оборудования $\pm 0,1$ Гц).

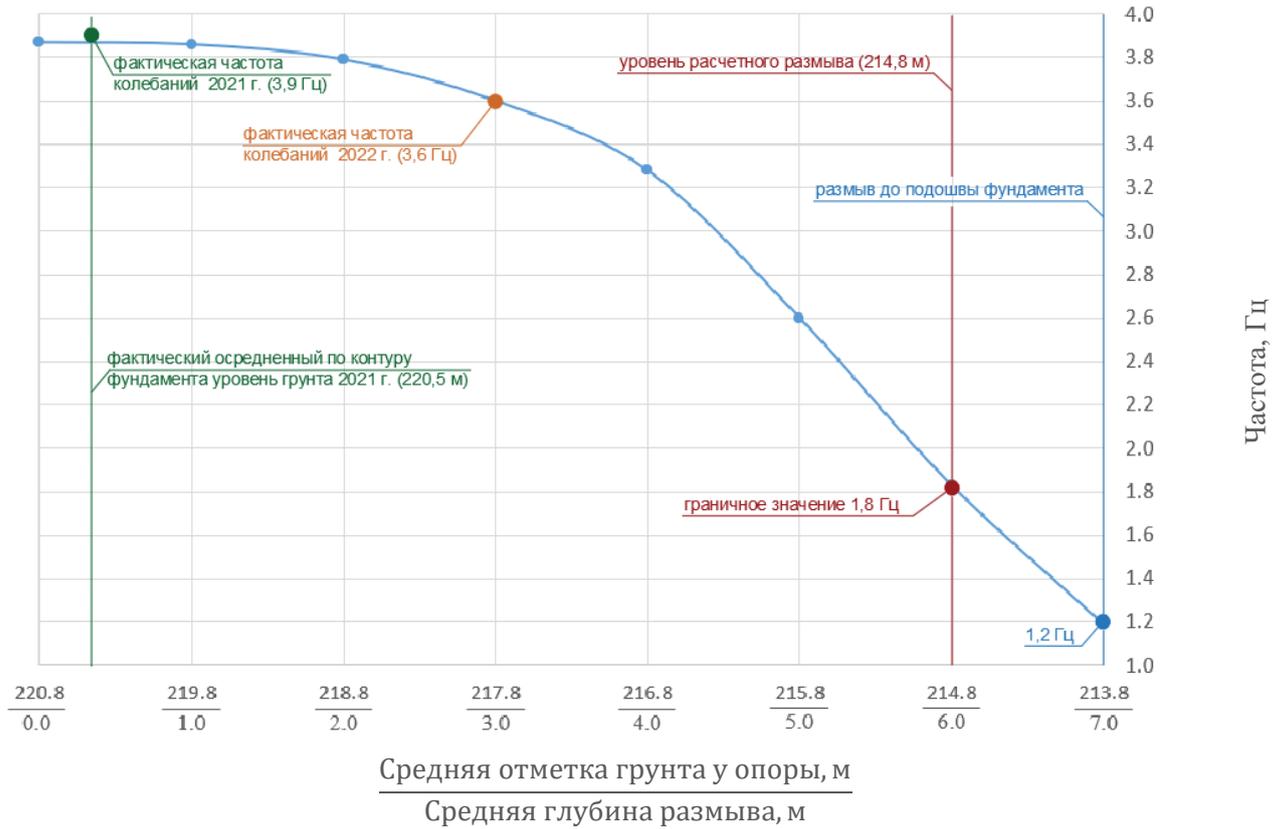


Рисунок 4.16 – График изменения частоты собственных колебаний опоры № 1 при развитии размыва и результаты мониторинга

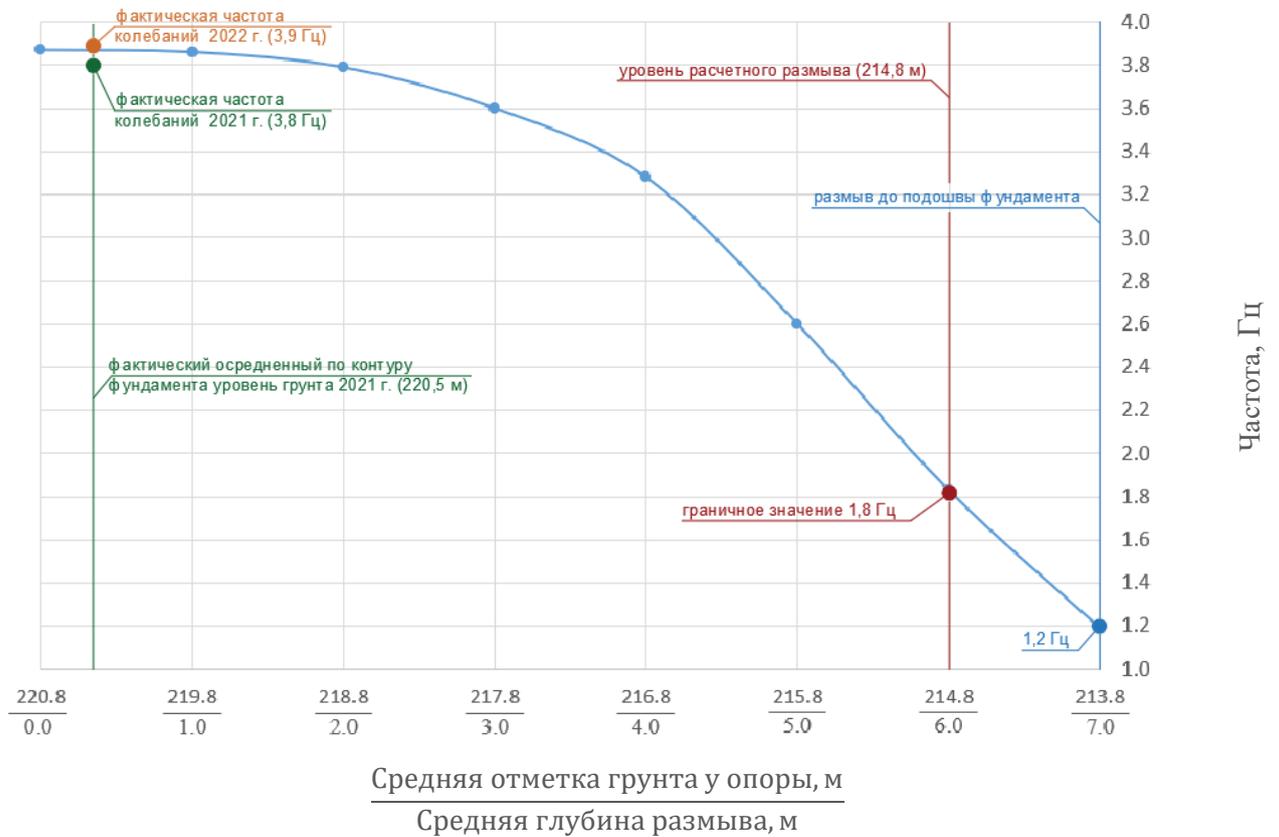


Рисунок 4.17 – График изменения частоты собственных колебаний опоры № 2 при развитии размыва и результаты мониторинга

4.3 Технико-экономический эффект от применения усовершенствованного способа мониторинга

Оценка технико-экономического эффекта от применения усовершенствованного способа выполнена на основе сравнения размера оплаты труда по мониторингу размыва грунта у одной опоры и границ применимости способов мониторинга. Результаты оценки экономического эффекта представлены в таблице 4.2. Стоимости указаны без учета транспортных расходов до места выполнения работ, стоимости оборудования, накладных расходов и налогообложения. Расчет выполнен согласно [67] на основании среднемесячной зарплаты инженера-проектировщика с учетом индекса изменения стоимости по отношению к базовым ценам на 1 января 2001 г., равного 5,7 по состоянию на IV квартал 2023 г. Трудозатраты по промеру глубин традиционными средствами 2 раза в год оценены в 6 чел/часов в год (2 часа в летний период года и 4 часа в зимний период с учётом вырубке лунок во льду). При этом минимальная численность рабочих составляет 3 человека. Трудозатраты по мониторингу частот собственных колебаний 2 раза в год оценены в 4,5 чел/часа в год (среднее значение с учётом повышенных трудозатрат на промеры глубин и получение расчетной зависимости частоты собственных колебаний от глубины размыва при первичных измерениях). Необходимое количество рабочих при мониторинге частот собственных колебаний составляет 2 человека. Таким образом с учетом индекса изменения стоимости и коэффициента удельного веса заработной платы размер оплаты труда при промерах глубин оценивается в 13 161 руб., а при мониторинге по частотам собственных колебаний в 6 580 руб. Отсюда экономический эффект от применения усовершенствованного способа мониторинга размыва грунта составит 6 581 руб. за одну опору. А с учётом того, что количество русловых опор на сети ОАО «РЖД», для которых необходим ежегодный мониторинг глубин размывов, составляет около 1 200 шт. (четверть от всех промежуточных опор, проанализированных в главе 2), экономический эффект составит 7 897 200 руб. в год. При этом стоит отметить, что способ промера глубин традиционными

средствами не применим в период паводков. Измерения чаще всего проводят в межень или ледостав, когда угроза размыва грунта у опор минимальная. Способ мониторинга размывов грунта у опор по частотам собственных колебаний позволяет проводить оперативную диагностику при любом уровне воды.

Таблица 4.2 – Расчетная экономическая эффективность за год

Способ мониторинга размыва грунта у одной опоры	Трудозатраты в год, чел/час	Количество рабочих, чел.	Среднемесячная зарплата инженера на 2001 г., руб.	Размер оплаты труда на IV квартал 2023 г., руб.
Промеры глубин традиционными средствами (2 раза в год)	6	3	8 620	13 161
Мониторинг по частотам собственных колебаний (2 раза в год)	4,5	2	8 620	6 580
Экономический эффект за одну опору:				+6 581
Экономический эффект за 1200 опор:				+7 897 200

Выводы по главе 4

В главе приведены положения разработанного автором алгоритма контроля глубины размыва грунта у опоры по частотам собственных колебаний. Алгоритм основан на результатах исследований автора, отражающих рекомендации к проведению натурных измерений, моделированию опоры и опирающихся на неё пролетных строений, получению расчетных зависимостей частоты собственных колебаний природно-техногенной системы от глубины размыва грунта у опоры и назначению граничных значений для мониторинга. Применение приведенных рекомендаций позволит применять усовершенствованный способ мониторинга для своевременного выявления размывов грунта у опор и контроля их глубины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований достигнута цель, заключающаяся в совершенствовании способа мониторинга размывов грунта у опор железнодорожных мостов за счёт контроля частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений. При этом были решены поставленные задачи и получены основные научные выводы.

1. Проведены натурные измерения частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений, при различном конструктивном исполнении элементов и фактическом уровне грунта у опор. В результате чего установлены экспериментальные качественные и количественные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем различного конструктивного исполнения от глубины размыва грунта у опор.

2. Обоснованы расчетные допущения при определении частоты собственных колебаний опоры с учётом её совместной работы с опирающимися на неё пролетными строениями и грунтом основания. Тем самым уточнена математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на неё пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях. Получены расчетные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем от глубины размыва грунта у опор. Соответствие принятых расчетных предпосылок фактической работе конструкции подтверждено сопоставлением получаемых частот с результатами натурных измерений для 35 эксплуатируемых опор.

3. Разработан алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний, позволяющий своевременно выявлять размывы опор и контролировать их глубину.

Экономический эффект от применения усовершенствованного способа мониторинга размыва грунта у опор по сравнению с методом промеров глубин в

зоне местных размывов, оцениваемый размером оплаты труда, составит 7 897 200 руб. в год.

Перспективой дальнейших исследований являются исследования динамической работы различных природно-техногенных систем с учётом конструктивных особенностей мостового сооружения и массы воды, вовлекаемой в колебательный процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, О. В. Основные принципы расчета отверстий больших мостов. – М.: Автотрансиздат, 1958. – С. 64.
2. Андреев, О. В. Проектирование мостовых переходов. – М.: Транспорт, 1980. – С. 215.
3. Андрианов, Ю. А. Актуальность проблемы эксплуатационной надежности мостов / Ю. А. Андрианов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – № 2(37). – С. 77-81.
4. Афанасьев, В.С. Комплексная экспериментальная оценка динамических параметров пролетных строений балочных мостов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.11 [Текст] / В.С. Афанасьев. – М., 2019. – 131 с.
5. Баранов, Т.М. Мониторинг параметров собственных колебаний городского моста через реку Иркут в Иркутске / Т.М. Баранов, А.А. Антипина, М.А. Евсевлева // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т.1. – С. 447-454.
6. Баранов, Т.М. Оценка фактической работы пролетного строения железнодорожного моста с использованием мобильной системы мониторинга / Т. М. Баранов, Е. О. Толстикова // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 475-481.
7. Баранов, Т.М. Результаты измерений параметров собственных колебаний некоторых городских мостов Иркутска / Т. М. Баранов, А. А. Антипина, М. А. Евсевлева // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 475-481.
8. Бардин, А.В. Влияние дефектов и повреждений на динамические параметры зданий / А. В. Бардин, А. В. Улыбин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы IX научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 11–12 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 13-21.

9. Белый, А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского [Текст] / А.А. Белый, А.А. Белов, А.И. Ященко, А.А. Антонюк // Путевой навигатор. – 2020. – № 45 (71). – С. 38 -45.

10. Белый, А. А. Мониторинг в системе управления надежностью мостов на автомобильных дорогах оборонного значения / А. А. Белый, В. Н. Мячин, С. А. Вуколов // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В.Хрулева. – 2020. – № 2(22). – С. 22-29.

11. Белый, А.А. Практические рекомендации по использованию средств инструментального мониторинга в системе управления надежностью транспортных объектов на автомобильных дорогах оборонного значения / А. А. Белый, В. Н. Мячин, С. А. Вуколов // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В.Хрулева. – 2021. – № 3(27). – С. 153-160.

12. Белый, А.А. Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 2. – С. 211-222.

13. Богданов, Г.И. Влияние конструкции противовеса на динамические свойства разводного пролетного строения / Г. И. Богданов, И. И. Рыбина // Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве : Международная научно-практическая конференция, посвященная 175-летию со дня рождения профессора Н.А. Белелюбского, Санкт-Петербург, 18–20 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. – С. 44-51.

14. Бокарев, С.А. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / С. А. Бокарев, И. И. Снежков, А. Н. Яшнов и др. // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 25.

15. Бокарев, С.А. Совершенствование системы надзора за искусственными сооружениями на железных дорогах / С. А. Бокарев, А. Н. Яшнов, С. С. Прибытков, А. В. Слюсарь // Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2005. – № 9. – С. 154-158.

16. Бондарь, И.С. Вибродиагностика балочных пролетных строений железнодорожных мостов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.11 [Текст] / И.С. Бондарь – М., 2019. – 172 с.

17. Бондарь, И.С. Диагностика и мониторинг балочных пролетных строений железнодорожных мостов / И. С. Бондарь, М. Я. Квашнин, С. А. Косенко // Политранспортные системы : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. по направлению «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2017. – С. 35-43.

18. Бондарь, Н.Г. Динамика железнодорожных мостов [Текст] / Н.Г. Бондарь, И.И. Казей, Б.Ф. Лесохин и др.– М.: Транспорт, 1965. – 412 с.

19. Брейсуэлл, Р. Н. Преобразование Фурье / Р. Н. Брейсуэлл // В мире науки. Scientific American. – 1989. – № 8. – С. 48–56.

20. Валиев, Ш. Н. Оценка параметрической надежности мостовых сооружений / Ш. Н. Валиев, А. И. Васильев // Транспортное строительство. – 2022. – № 2. – С. 4-6.

21. Васильчук, Л. А. Диагностика подмывов опор мостов по динамическим параметрам / Л. А. Васильчук, А. Н. Яшнов // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика - Днепр, 2020. – № 18. – С. 18-27.

22. Васильчук, Л.А. Выявление дефектов по изменениям динамических параметров конструкции / Л. А. Васильчук, А. Н. Яшнов // Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений [Электронный ресурс]: материалы IV Международной студенческой конференции – Минск: БНТУ, 2020. - С. 392 – 394.

23. Васильчук, Л.А. Методы обнаружения размывов опор мостов / Л.А. Васильчук, И.В. Чаплин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – №1. – С. 83-92.
24. Власов, Г.М. Проектирование опор мостов [Текст] / Г.М. Власов – Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2003. – 332 с.
25. ВСН 62-69 Технические указания по расчету местного размыва у опор мостов, струенаправляющих дамб и траверсов. – М.: Минтрансстрой, 1970. – С. 40.
26. Глушков, С.П. Аппроксимация собственных колебаний балки с помощью полиномиальной функции при моделировании взаимодействия балки с повреждениями с движущейся по ней массой / С.П. Глушков, Н.А. Донец, В.А. Каргин / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 232-237.
27. Глушков, С. П. Идентификация повреждений в мостовых конструкциях на основе анализа их колебательных процессов / С. П. Глушков, Л. Ю. Соловьев, Н. А. Донец // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 4. – С. 209-220.
28. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 41 с.
29. ГОСТ 34081-2017 Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. – М. : Стандартинформ, 2017. – 19 с.
30. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – Климатический центр Росгидромета. – Санкт-Петербург. – 2017. – 106 с.
31. Донец, Н. А. Идентификация повреждений в балочных пролетных строениях мостов на основе анализа отклика проходящих по ним транспортных средств : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Донец Николай Александрович. – Новосибирск, 2013. – 24 с.
32. Донец, Н. А. Учет демпфирования при моделировании взаимодействия балки с повреждениями с движущейся по ней массой / Н. А. Донец, А. Н. Донец //

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 28. – С. 94-102.

33. Дьяченко, Л.К. Исследование динамической работы пролетных строений железнодорожных мостов / Е. Е. Луковников, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3(66). – С. 41-50. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_66_41.

34. Журавлев, М. М. Местный размыв у опор мостов. – М.: Транспорт, 1984. – 112 с.

35. Зусман, Г.В. Вибродиагностика [Текст] / Г.В. Зусман, А.В. Барков – М.: Спектр, 2011. – 215 с.

36. Иванов, А. Н. Мониторинг технического состояния автодорожного моста через реку Пашенку / А. Н. Иванов, П. Ю. Кузьменков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2(37). – С. 20-27.

37. Иванченко, И. И. Динамика мостовых и путевых конструкций при действии железнодорожной подвижной нагрузки / И. И. Иванченко // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2005. – №4. – С. 158-162.

38. Инструкция по гидрологическому мониторингу мостовых переходов ОАО «РЖД» // Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.12.2012 № 2540р.

39. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД» от 01.10.2019 г. № 2162/р.

40. Инструкция по содержанию искусственных сооружений // Распоряжение ОАО «РЖД» от 02.10.2020 № 2193/р.

41. Инструкция по содержанию подводной части опор железнодорожных мостов / ОАО «РЖД». Департамент пути и сооружений. НИИ мостов и дефектоскопии. – М. ОАО «НИИТКД», 2009. – 220 с.

42. Казей, И. И. Динамический расчет пролетных строений железнодорожных мостов / И. И. Казей – М. : Трансжелдориздат, 1960. – 467 с.

43. Картопольцев, В. М. Регулирование динамических характеристик несущих балок пролетных строений автодорожных мостов / В. М. Картопольцев,

А. В. Картопольцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 188-198. – DOI 10.31675/1607-1859-2022-24-4-188-198.

44. Козлов, А. В. Численное моделирование аэродинамической устойчивости мостов больших пролетов / А. В. Козлов, В. С. Сафронов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 1(65). – С. 114-121. – DOI 10.36622/VSTU.2022.65.1.011.

45. Кокодеев, А. В. Обеспечение безаварийной эксплуатации мостов и других транспортных сооружений путем обследования и мониторинга их подводных частей: состояние проблемы в России / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – № 1. – С. 69-87.

46. Кокодеев, А. В. Обследование, мониторинг, выполнение ремонтных и восстановительных работ на подводных частях транспортных сооружений / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 5(24). – С. 4.

47. Кокодеев, А. В. Обследование подводных конструкций транспортных сооружений в Российской Федерации / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – Т. 1. – С. 399-405.

48. Кокодеев, А. В. Применение инновационных технологий при подводном обследовании транспортных сооружений / А. В. Кокодеев, И. Г. Овчинников // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2015. – № 1(16). – С. 63-72. – DOI 10.15688/jvolsu10.2015.1.8.

49. Кондратов, В. В. Динамическое воздействие высокоскоростных поездов на пролетные строения мостов / В. В. Кондратов // Дороги. Инновации в строительстве. – 2011. – № 11. – С. 66-69.

50. Кондратов, В. В. Расчетно-экспериментальные исследования динамического взаимодействия пролетного строения и опор железнодорожного

моста / В. В. Кондратов, В. А. Петров, С. С. Ковалинский // Известия Петербургского университета путей сообщения. Вып. 3. – 2016. – С. 344-352.

51. Коротков, В. А. Анализ динамических методов расчета строительных конструкций АЭС / В. А. Коротков // Вестник НИЦ Строительство. – 2023. – № 2(37). – С. 7-17. – DOI 10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17.

52. Костерин, Э. В. Основания и фундаменты [Текст] / Э.В. Костерин. – М.: Высш. шк., 1990. – 431 с.

53. Котляревский В.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Перепелицын А.И. Мониторинг устойчивости и остаточного ресурса высотных зданий и сооружений с применением мобильного диагностического комплекса «Стрела» // ДонНТУ URL: <http://masters.donntu.ru/2008/kita/sherstyuk/library/art4/art4.htm> (дата обращения: 08.02.2023).

54. Крутиков, О. В. Система мониторинга состояния конструкций моста на остров Русский во Владивостоке / О. В. Крутиков, И. Ш. Гершуни // Дороги. Инновации в строительстве. – 2011. – № 10 – С. 62-64.

55. Крутиков, О.В. Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста при мониторинге / О.В. Крутиков, И.Ш. Гершуни, Д.И. Рыжов // Транспортные сооружения. – 2022. – Т. 9. – № 2.

56. Курчанов, П.О. Теоретическая и экспериментальная оценка динамического отклика пролетного строения при отказе гибкой связи / П. О. Курчанов, Д. А. Ярошутин, Д. А. Шестовицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4(67). – С. 68-75. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_68.

57. Куштин, А.А. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений / В. И. Куштин, А. А. Ревякин, В. А. Соколова, Н. Ф. Добрынин // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11(71). – С. 27-37.

58. Ланг, А. В. Исследования динамической работы пролетных строений / А. В. Ланг, Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 16-19. – EDN XOYGVCS.

59. Лебедин, А.П. Обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений как основной элемент их безаварийной эксплуатации / А. П. Лебедин, С. А. Баранов, Е. С. Васюткин, А. А. Белый // Композитные системы на объектах подземного и гражданского строительства : Сборник трудов Первой Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. – С. 150-158.

60. Лившиц, Я. Д. Примеры расчета железобетонных мостов [Текст] / Я.Д. Лившиц, М.М. Онищенко, А.А. Шкуратовский. – К.: Вища шк. Головное издательство, 1986. – 263 с.

61. Локтев, А.А. Особенности динамического поведения пролетного строения низководных мостов / А. А. Локтев, Д. А. Локтев, Л. А. Илларионова, А. Баракат // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 2. – С. 72-81. – DOI 10.15593/24111678/2022.02.09.

62. Махмутов, А. Д. Оценка прочности опор линий электропередач методом вибродиагностики / А. Д. Махмутов // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 20–22 декабря 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 328-331.

63. Махонько, А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько, А. В. Мальков, А. А. Белый, А. А. Антонюк // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 83-96. – DOI 10.17816/transsyst20239283-96.

64. Махонько, А.А. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько, А. В. Мальков, А. А. Белый, А. А. Антонюк // Путевой навигатор. – 2023. – № 56(82). – С. 68-77.

65. Мониторинг устойчивости и остаточного ресурса высотных зданий и сооружений с применением мобильного диагностического комплекса «Стрела» [Электронный ресурс] / В.А. Котляревский, С.П. Суцев, В.И. Ларионов, А.И. Перепелицын // ДонНТУ. – URL: <http://masters.donntu.ru/2008/kita/sherstyuk/library/art4/art4.htm> (дата обращения: 08.02.2023).

66. Новак, Ю. В. Динамические методы испытаний мостовых сооружений и уникальных сооружений / Ю. В. Новак, О. А. Виноградова, М. Е. Соломенцев // Транспортное строительство. – 2009. – №7. – С. 2-4.

67. Об определении стоимости проектных, изыскательских и других работ (услуг) для строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта и других объектов ОАО «РЖД» // Распоряжение ОАО «РЖД» от 28 декабря 2009 г. № 2697р.

68. Овчинников, И.Г. Особенности применения пассивного вибромониторинга для оценки технического состояния мостов / И.Г. Овчинников, А.П. Косауров, Д.И. Суров, Т.Н. Зверева // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. – 2019. – С. 351-359.

69. Осадчий, Г.В. Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона "Санкт-Петербург Арена" / Г. В. Осадчий, А. А. Белый, Д. В. Ефанов, Д. А. Шестовицкий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 6(69). – С. 10-24. – DOI 10.18720/CUBS.69.2.

70. ОДМ 218.4.001-2008 Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостов на автомобильных дорогах // МГУПС. – М. : ОАО «ЦПП», 2008. – 70 с.

71. Пат. 2284489 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/02. Способ вибрационного контроля технического состояния пролетных строений мостовых конструкций / Т. В. Селиванова, Н. Н. Бочкарев, А. В. Картопольцев; заявитель и

патентообладатель ГОУВПО "ТГАСУ". – № 2005109688/28 ; заявл. 04.04.2005 ; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. – 10 с.

72. Пат. 2194978 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 7/00. Способ контроля технического состояния пролетных строений / Н. И. Дегтев, В. А. Кузьмин, В. Н. Щукина [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГУП "Научно-производственное предприятие "Квант". – № 2000127217/28 ; заявл. 30.10.2000 ; опубл. 20.12.2002, Бюл. № 35. – 10 с.

73. Пат. 2411478 Российская Федерация, МПК G 01 M 5/00. Способ диагностики технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений / С. А. Бокарев, И. И. Снежков, Л. Ю. Соловьев [и др.]; патентообладатель ОАО "Российские железные дороги". – № 2009104967/28 ; заявл. 13.02.2009 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 7 с.

74. Пат. 2498255 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/00. Способ оценки жесткости и прочности автодорожных и железнодорожных мостов / В. В. Кашкаровский, В. В. Устинов, Т. М. Баранов ; заявители и патентообладатели В. В. Кашкаровский, В. В. Устинов, Т. М. Баранов. – № 2011150598/28 ; заявл. 12.12.2011 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 14 с.

75. Пат. 2589459 Российская Федерация, МПК G 01 L 5/04. Способ диагностики преднапряженных железобетонных пролетных строений балочного типа / А. Н. Яшнов, И. В. Чаплин ; заявитель и патентообладатель СГУПС. – № 2014138252/28 ; заявл. 22.09.2014 ; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 8 с.

76. Пат. 2613484 Российская Федерация, МПК G 01 L 1/10, G 01 L 5/04. Способ определения усилий натяжения вантового элемента моста / А.Н. Яшнов, И.В. Чаплин, И.И. Снежков [и др.]; заявитель и патентообладатель СГУПС. – № 2015134616 ; заявл. 17.08.2015; опубл. 16.03.2017, Бюл. № 6. – 9 с.

77. Пат. 2778277 Российской Федерации, МПК G 01 M 7/00. Способ мониторинга технического состояния мостовых опор в процессе их эксплуатации / Л.А. Васильчук, И.В. Чаплин, А.Н. Яшнов, П.Н. Стрекаловский; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2021122624 ; заявл. 28.07.2021 ; опубли. 17.08.2022, Бюл. № 23. – 2 с.

78. Полякова Л.А. Диагностика размывов опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний / Л.А. Полякова // Вестник СГУПС. – 2023. – № 3 (66). – С. 5-12.

79. Поляков, В. Ю. Об экстремумах функционала качества балочных мостов со стационарным оптимальным управлением / В. Ю. Поляков, В. В. Саурин, И. М. Демидов // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого) : Материалы XVI Международной научной конференции, Москва, 01–03 июня 2022 года / Под общей редакцией В.Н. Тхай. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2022. – С. 352-354.

80. Поляков, В. Ю. О подавлении колебаний балочных мостов поездом как инерционным демпфером / В. Ю. Поляков, В. В. Саурин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 6. – С. 89-97. – DOI 10.31857/S0572329923600251.

81. Поляков, С. Ю. Методика определения напряженно-деформируемого состояния вантовых подвесок Бугринского моста через р. Обь / С. Ю. Поляков, И. В. Чаплин, А. Н. Яшнов // Справочник инженера. Вып. 5. – М., 2014. – С. 56–63.

82. Поляков, С. Ю. Экспериментальная проверка натяжения вант на Бугринском мосту / С. Ю. Поляков, А. Н. Яшнов // Интеллектуальный потенциал Сибири. Современные проблемы технических наук: Новосибирская межвузовская науч. студ. конф. : тез. докл. – Новосибирск, 2014. – С. 96.

83. Пустова Л. А. Исследование влияния формы опор на свайных ростверках на местный размыв / Л. А. Пустова // Совершенствование конструкции железобетонных пролетных строений автодорожных мостов и технологии их строительства. – М.: Тр. Союздорнии. - 1982. – С. 82-92.

84. Пичугов Г. С. Влияние формы фундамента мостовых опор на местный размыв / Г. С. Пичугов // Тр. Гипродорнии. – 1980. - № 31. – С. 93-99.

85. Савин, С. Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала "Пушкинский" в г. Москва / С. Н. Савин // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 7(33). – С. 58-62.

86. Савин, С. Н. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 / С. Н. Савин, С. В. Демишин, И. В. Ситников // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7(25). – С. 33-39.

87. Сафронов, В. С. Разработка и апробация методики оценки динамических качеств автодорожного моста / В. С. Сафронов, А. В. Антипов // Строительная механика и конструкции. – 2021. – № 4(31). – С. 40-55. – DOI 10.36622/VSTU.2021.31.4.004.

88. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

89. Силин, К.С. Проектирование фундаментов глубокого заложения / К.С. Силин, Н.М. Глотов, К.С. Завриев. – М.: Транспорт. – 1964. – 776 с.

90. Смирнов, В. Н. Динамическая работа мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей при продольных воздействиях поездной нагрузки / В. Н. Смирнов. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2013. – 64 с. – ISBN 978-5-7641-0562-8.

91. Смирнов, В. Н. К вопросу о влиянии массивности и жесткости мостовых опор на динамические характеристики балочных мостов высокоскоростных магистралей / В. Н. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 6. – С. 12-13.

92. Смирнов, В. Н. Почему у нас стали падать мосты? / В. Н. Смирнов // Путевой навигатор. – 2019. – № 38(64). – С. 20-23.

93. Соловьев, Л.Ю. Оценка технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений на основе идентификации конечно-элементных моделей в ПО «Sofistik» / Л.Ю. Соловьев, Д.Н. Цветков // Вестник Пермского государственного

технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1. – С. 99-106.

94. Соломенцев, М. Е. Методика динамической диагностики типовых балочных железобетонных пролетных строений автодорожных мостов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Соломенцев Михаил Евгеньевич. – М., 2011. – 143 с.

95. СП 24.13330.2021 «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты». – М. – 2021. – 121 с.

96. СП 79.13330.2012 «Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний». – М. – 2013. – 38 с.

97. Стрелков, К.С. Мониторинг динамической реакции вантового моста через р. Обь у г. Сургута от внешнего воздействия при эксплуатации [Текст] / К.С. Стрелков, Б.А. Логунов, Г.А. Белов и др. // Вестник мостостроения. – 2002. – №1-2. – С.40-43.

98. Сущев, С.П. О применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях / С. П. Сущев, Р. Р. Галиуллин, С. Н. Савин [и др.] // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2013. – № 3. – С. 84-91.

99. Улыбин, А. В. Измерение периодов и декрементов колебаний многоэтажных зданий / А. В. Улыбин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы VIII международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13 октября 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 192-202.

100. Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений".

101. Федотов, Г.А. Дорожные переходы через водотоки / Г.А. Федотов, Г.Г. Наумов. – Учебное пособие: Инфра-М. – 2015. – 520 с.

102. Цветков, Д. Н. Оценка технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Цветков Дмитрий Николаевич. – Новосибирск, 2010. – 124 с.

103. Чаплин, И. В. Вибродиагностика мостовых сооружений и их элементов / И. В. Чаплин // Наука и молодежь СГУПС в третьем тысячелетии: сб. научн. ст. аспирантов и аспирантов-стажеров. – 2015. - № 4. – С. 200-209.

104. Ярославцев И. А. Расчет местного размыва у мостовых опор / И. А. Ярославцев. – ЦНИИС, Сообщение № 80. – М.: 1956 – 16 с.

105. Яшнов А.Н. Диагностика и мониторинг состояния струнных транспортных систем / А.Н. Яшнов, Л.А. Васильчук, П.Ю. Кузьменков, И.В. Чаплин // Инновационные транспортные системы и технологии. - 2021. - Т. 7. - №4. - С. 43-51. doi: 10.17816/transsyst20217443-51.

106. Яшнов, А. Н. Мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций мостов в процессе сооружения / А.Н. Яшнов, П. Ю. Кузьменков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь, 2012. – № 3. – С. 330-335.

107. Яшнов, А.Н. Мониторинг усилий натяжения вант Виноградовского моста через протоку Татышева в г. Красноярске по частотам их собственных колебаний / А. Н. Яшнов, И. В. Чаплин, Т. М. Быкова, Т. М. Баранов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. - № 4 (68). – С. 135-141.

108. Яшнов, А. Н. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске / А. Н. Яшнов, Т. М. Баранов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (60). – С. 199-209.

109. Яшнов А.Н. Опыт комплексной диагностики подводной части русловых опор мостов / А.Н. Яшнов, Л.А. Васильчук, С.В. Ефимов, И.В. Засухин, И.В. Чаплин // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 7. – С. 18-20.

110. Яшнов, А. Н. Опыт применения диагностики и оценки технического состояния мостовых конструкций по динамическим параметрам / А. Н. Яшнов, И. В. Чаплин // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: сб. науч. ст. XXI науч.-метод. конф. ВИТУ. – СПб, 2017. – С. 181–185.

111. Яшнов, А. Н. Организация мониторинга напряженно-деформированного состояния мостов на высокоскоростных магистралях / А. Н. Яшнов // Инновационный транспорт - 2016: специализация железных дорог: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – С. 400-410.

112. Яшнов, А. Н. Совершенствование методики диагностики железобетонных пролетных строений по результатам исследований их динамической работы / А. Н. Яшнов, А. В. Слюсарь // Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала. – Новосибирск, 2005. – С. 83-85.

113. Al-jubouri, Muhanad. Methods to detect and measure scour around bridge foundations / Muhanad al-jubouri, Richard Ray // Acta Technica Jaurinensis. – 2021. – Vol. 14. DOI:10.14513/actatechjaur.00626.

114. Bao, Ting. Bridge scour characteristic curve for natural frequency-based bridge scour monitoring using simulation-based optimization / Ting Bao, Zhen Liu // Structural Control and Health Monitoring. – 2021. – Vol. 28. DOI:10.1002/stc.2773.

115. Bao, T. Vibration-based bridge scour detection: A review / T. Bao, Z. Liu // Structural Control and Health Monitoring. – 2016. – Vol. 24, № 7.

116. Borlenghi, Paolo. Long-term monitoring of a masonry arch bridge to evaluate scour effects / Paolo Borlenghi, Carmelo Gentile, Manuel D'Angelo // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 411 (3). DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.134580.

117. Briaud, J. L. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiments and numerical simulations / J. L. Briaud, C. Yao, C. Darby et al // Transportation Research Board (TRB) 89th Annual Meeting, Washington, DC, Transportation Research Board. - 2010.

118. Briaud, J. L. Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology / J. L. Briaud, S. Hurlebaus, K. Chang et al // Austin, USA. – 2011.

119. Carrasco, S.M. Monitoring Scour at Bridge Piers in Rivers with Supercritical Flows. Hydrology / S.M. Carrasco, R. Herrera, M. Guerra, B. Ettmer et al // Hydrology. – 2023. - 10, 147. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070147>.

120. Farooq, Mohammed. Robust capacitance sensors for wireless bridge scour monitoring / Mohammed Farooq, Fae Azhari, Nemkumar Banthia // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2022. – Vol. 13 (3). DOI:[10.1007/s13349-022-00649-2](https://doi.org/10.1007/s13349-022-00649-2).

121. Hachem, Solaine. Scour damage detection of bridge piers using the vibration-based method: numerical study on a steel-concrete bridge in France / S. Hachem, F. Bourquin, D. Siegert. - 2023. DOI: 10.12783/shm2023/36735.

122. <https://zab.ru/news/107046>

123. Huang, H. Y. Application of finite element method and genetic algorithms in bridge scour detection / H. Y. Huang, W. Y. Chou, S. H. Ju, C.W. Feng // Society for Social Management Systems Internet Journal. - 2012.

124. Jiang, ShengHua. Bridge scour monitoring using smart magnetic rock / ShengHua Jiang, QiuLi Wang, WeiHe Sun, YuGuang Tan // Measurement. – 2022. – Vol. 205. DOI:[10.1016/j.measurement.2022.112175](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112175).

125. Kariyawasam, Kasun. A vibration-based bridge scour monitoring technique. – 2020. DOI:[10.17863/CAM.58843](https://doi.org/10.17863/CAM.58843).

126. Kirsanov, M. Analytical estimation of the first natural frequency and analysis of a planar regular truss oscillation spectrum / M. Kirsanov, V. Safronov // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 3(111). – P. 11114. – DOI [10.34910/MCE.111.14](https://doi.org/10.34910/MCE.111.14).

127. Ko, Y. Scour evaluation of bridge foundations using vibration measurement / Y. Ko, W. Lee, W. Chang, H. Mei, C. Chen // 5th International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, CA, USA. - 2010.

128. Laflamme, Simon. Perspective on Structural Health Monitoring of Bridge Scour. Measurement Science and Technology. – 2024. DOI:[10.1088/1361-6501/ad23be](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad23be).

129. Laursen E. M., Toch A. Scour around bridge and abutments / E. M. Laursen, A. Toch // Iowa highway research board. – 1956. - № 4. – 60 p.
130. Lin, T.-H. Field Study of Bridge Scour Using Imote2. NET-Based Wireless Monitoring System / T.-H. Lin, Y.-C. Lu, S.-L. Hung // The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology. - 2011.
131. Lin, T. K. Implementation of a vibration-based bridge health monitoring system on scour issue / T. K. Lin, Y. P. Wang, M. C. Huang, C. A. Tsai // Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ. - 2013.
132. Masui, Y. Development of a Soundness Evaluation System for Bridge Substructured / Y. Masui, O. Suzuki // JR East Tech. Rev. – 2009. – Vol. 14, № 14. – 65 p.
133. Micu, E. Scour Repair of Bridges Through Vibration Monitoring and Related Challenges / E Micu, Muhammad Khan, Basuraj Bhowmik et al // Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. – 2022. – P. 499-508. DOI:[10.1007/978-3-030-91877-4_57](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_57).
134. Midas Civil Calculation Manual // MIDAS Information Technology. - M. : MIDAS Information Technology, 2012. - 269 p.
135. Poliakov, V. The Method for Determining Conditions to Vibrations Suppression of Bridge Beams / V. Poliakov, V. Saurin, Zh. Nan // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2023. DOI 10.1142/S0219455424501347.
136. Prendergast, L. An Investigation of the Changes in the Natural Frequency of a Pile affected by Scour / L. Prendergast, D. Hester, K. Gavin et al // Journal of sound and vibration. – 2013. – Vol. 332, № 25. – P. 6685-6702.
137. Tison L. J. Local scour in rivers – L. J. Tison // Journal of geophysical research. – 1961. – Vol. 66, № 12. – P. 4227-4232.
138. Raju, Rahul Dev. Feasibility of Using Green Laser in Monitoring Local Scour around Bridge Pier / Rahul Dev Raju, Sudhagar Nagarajan, M Arockiasamy, Stephen Castillo // Geomatics. – 2022. – Vol. 2. – P. 355-369. DOI:10.3390/geomatics2030020.

139. Vardanega, Paul. Assessing the Suitability of Bridge Scour Monitoring Devices / Paul Vardanega, Gianna Gavriel, Maria Pregnolato // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering. – 2021. – Vol. 174. – P. 105–117. DOI:[10.1680/jfoen.20.00022](https://doi.org/10.1680/jfoen.20.00022).

140. Vardanega, Paul. Recent progress developing a rating framework for evaluating SHM for bridge scour / Paul Vardanega, Gianna Gavriel, Maria Pregnolato // Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems. – 2023. – P. 1705-1712. DOI:10.1201/9781003323020-209.

141. Verification of the modeling results of oscillations of an elastic-supported system with displacement limiters under moving load / I. Ravodin, S. Yu. Gridnev, Yu. I. Skalko [et al.] // Australian Journal of Structural Engineering. – 2023. – No. 6/II. – P. 1-8. – DOI 10.1080/13287982.2023.2214414.

142. Yao, C. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiment with a shallow foundation / C. Yao, C. Darby, O.-Y. Yu et al // GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design, West Palm Beach, USA, GeoFlorida. - 2010.

143. Zhang, Zhenhao. A Review of Vibration-Based Scour Diagnosis Methods for Bridge Foundation / Zhenhao Zhang, Guowei Lin, Xiaopeng Yang et al // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. DOI: 10.3390/su15108210.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2778277

Способ мониторинга технического состояния мостовых опор в процессе их эксплуатации

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС) (RU)*

Авторы: *Васильчук Любовь Александровна (RU), Чаплин Иван Владимирович (RU), Яшнов Андрей Николаевич (RU), Стрекаловский Павел Николаевич (RU)*

Заявка № 2021122624

Приоритет изобретения **28 июля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **17 августа 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **28 июля 2041 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
УПРАВЛЕНИЕ ПУТИ И СООРУЖЕНИЙ**

ул. Каланчевская, д. 35,
г. Москва, 107174,
тел.: (499) 262-73-51, факс: (499) 260-77-61,
e-mail: CyganovaNS@center.rzd.ru

СПРАВКА

**о внедрении результатов диссертационной работы Поляковой Л.А.
«Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов по
частотам собственных колебаний»**

Настоящей справкой подтверждается практическое использование результатов исследований Поляковой Л. А. на тему: «Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний» при комплексном подводно-техническом обследовании опор железнодорожных мостов Дальневосточной железной дороги. Полученные данные о динамической работе конструкций позволяют организовать наблюдения за глубиной размыва грунта у опор с учетом рекомендаций соискателя.

Заместитель начальника



03.04.2024. Д.В.Еськов



РОСЖЕЛДОР
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ» (СГУПС)**

✉ Дуси Ковальчук ул., д. 191 г. Новосибирск, 630049 ☎ тел.: (383) 328-04-70, 328-05-75 факс: (383) 226-79-78 e-mail: public@stu.ru http://www.stu.ru

ОГРН 1025401011680 ИНН / КПП 5402113155 / 540201001 ОКПО 01115969

04.04.24 № 789
на № _____ от _____

В диссертационный совет
99.2.054.02

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Поляковой Л.А.
«Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам
собственных колебаний» в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается практическое использование в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» на кафедре «Мосты» факультета «Мосты и тоннели» основных результатов диссертационной работы Поляковой Л.А. «Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний».

Результаты, полученные Поляковой Л.А. в ходе работы над диссертацией, нашли применение в рамках дисциплины Б1.О.34 «Содержание и реконструкция мостов и тоннелей» для студентов специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей».

Проректор по учебной работе,
канд. техн. наук, доцент



Декан факультета «Мосты и тоннели»,
канд. техн. наук, профессор

А.А. Новоселов

С.А. Бахтин