

АО «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Кафедра «Мосты и тоннели»

УДК 693.54-183.44

Кучимов Султон Абжаббарович

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА НЕСУЩИЕ
ЭЛЕМЕНТЫ МОСТОВ

Специальность:

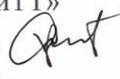
5А340603 «Эксплуатация мостов и транспортных тоннелей»

ДИССЕРТАЦИЯ

представлена на соискание степени магистра

Диссертация рассмотрена и
рекомендована к защите

зав.кафедрой «МиТТ»

доц. Раупов Ч.С. 

« 28 » 06 2015 г.

Научный руководитель

 доц. Рахманов У.И.

Ташкент 2015

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА НЕСУЩИЕ
ЭЛЕМЕНТЫ МОСТОВ**

**ГЛАВА I. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА. ШУМ И ВИБРАЦИЯ ПРИ
ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДОВ.**

Введение

Транспорт - важнейшая составная часть экономики страны. Транспорт страны часто сравнивают с кровеносными сосудами в живом организме. Это сравнение обусловлено тем, что так же, как кровь питает живые клетки организма всем необходимым, так и транспорт обеспечивает общество всеми видами перевозок.

Актуальность темы. Искусственные сооружения. На реконструируемых железнодорожных линиях для движения скоростных пассажирских поездов, мосты должны иметь грузоподъемность не ниже III категории, согласно утвержденному МПС «Руководству по пропуску подвижного состава по железнодорожным мостам». При реконструкции и капитальном ремонте пролетные строения с безбалластным мостовым полотном рекомендуется заменять на мосты с ездой на балласте, а при пролетных строениях до 16,5 м такая замена обязательна. В качестве балласта необходимо применять щебень из твердых пород фракции 25—60 мм. Толщина слоя балласта под шпалой в подрельсовой зоне должна быть не менее 30 см, а размеры балластных призм — обеспечивать возможность глубокой очистки балласта машинами СЧ-600, РМ 80 и др.

Новые мосты и трубы проектируют в соответствии с действующими СНиП 2.05.03—84 с учетом дополнительных требований, предъявляемых к сооружениям на скоростных дорогах.

Мосты с ездой на балласте разрешается располагать на участках с любым планом и профилем пути, принятых для скоростных дорог, а мосты с безбалластной проезжей частью на прямых участках пути и на уклонах не круче 4 %.

К высокоскоростным железнодорожным магистралям предъявляются еще более жесткие требования по конструкции пути на искусственных сооружениях. Эти нормы уточняются на основе исследований и опыта эксплуатации зарубежных линий.

В связи с вышеупомянутым исследование влияния скоростного движения поездов на несущие элементы мостов является **актуальным**.

Для достижения цели необходимо исследовать влияние скоростей перемещающихся нагрузок на несущие элементы мостов. Описать колебания середины невесомого и тяжелого балочного моста при перемещении по ней легкого и тяжелого грузов с определённой скоростью.

Научная новизна – исследования влияния скорости перемещающихся нагрузок на несущие элементы моста и колебания середины моста.

Уже не первый десяток лет жители развитых стран предпочитают самолетам, автобусам и автомобилям особый тип железнодорожного транспорта, известный как высокоскоростные железнодорожные экспрессы.

На это есть немало причин. Во-первых, как высокоскоростные железнодорожные экспрессы – безопасный вид транспорта. Кроме того, такой экспресс доставит вас прямо в центр города точно по расписанию и, в отличие от авиатранспорта, избавит от необходимости ловить такси, стоять в пробке, добираться еще в течение часа от аэропорта до мегаполиса или менять все планы из-за плохой погоды и, как результат, задержки рейса. А еще есть возможность избежать таких «приятных» вещей, как турбулентность и утомительные, длительные процедуры таможенного паспортного контроля и регистрации. И потом, ведь многие путешественники просто боятся летать!

Высокоскоростные железнодорожные экспрессы всем остальным видам транспорта сейчас предпочитают большинство пассажиров во всем мире – ведь они комфортабельные, надежные, вместительные и относительно дешевые. Особые преимущества высокоскоростные железнодорожные экспрессы имеют (по сравнению с авиа- и автотранспортом) на расстояниях до 700-800 км (время в пути – 3-4 часа).

Выгодно развитие скоростных ж/д путей и официальным властям. Ведь подобный вид транспорта экологичен и позволяет в краткие сроки

обеспечить регулярное сообщение даже между небольшими населенными пунктами.

Гарантирована и экономическая рентабельность запуска высокоскоростные железнодорожные экспрессы – их востребованность подтвердит любой специалист в данной области. Вспомните многочисленные примеры японских служащих, живущих в 200-300 км от Токио или Осаки и каждый день едущих на работу и обратно!

В то же время высокоскоростные железнодорожные экспрессы являются истинной гордостью той страны, где они созданы и курсируют, показателем ее научно-технического потенциала, уровня социального и экономического развития и заботы о гражданах. В нашей обзорной статье мы предлагаем читателям «Тест-Драйва» кратко ознакомиться с таким, без преувеличения, уникальным явлением, как высокоскоростные железнодорожные экспрессы различных стран мира.

Основной камень преткновения тотального внедрения высокоскоростных железнодорожных экспрессов во многих странах – необходимость затратной постройки для них своей, совершенно новой, высокотехнологичной инфраструктуры путей сообщения.

Создание и серийный выпуск современного поезда, имеющего возможность двигаться на высокой скорости, – небольшая проблема; загвоздка в том, ГДЕ это движение может быть. А кроме того, что «может», еще и «должно» быть действительно стабильным, безопасным и комфортным.

Для высокоскоростных железнодорожных экспрессов необходимы особые, «длинные» бесстыковые рельсы с эластичными соединениями. Разумеется, высокие скорости подразумевают квалифицированный и качественный процесс укладки пути с повышенными требованиями к глубине усиленной гравийной «подушки» и высоте и форме насыпи. Также необходима модернизация верхних строений путей и более густая закладка шпал, причем исключительно бетонных, а также применение спецпрофиля и

сплава при изготовлении «быстрого» рельса. Нередко для высокоскоростные железнодорожные экспрессы необходима более широкая колея – для устойчивости состава; соответственно, меняются требования и к туннелям, мостам и станциям.

Совершенно очевидны и нормы безопасности – пути для скоростного движения не имеют автомобильных переездов и пересечений с другими ж/д линиями, а также ограждаются сплошной защитой по всей длине, дабы избежать выхода на полотно людей или животных.

Важно и то, что рельсы требуется прокладывать с максимально большими радиусами поворотов, для избежания кренов состава на высоких скоростях. Так, например, поворот линии на 90° занимает от 4 до 7 км «лишнего» крюка!

1.1. Высокоскоростные пассажирские поезда мира

Германия

Германские экспрессы Inter City Express (ICE) – это, пожалуй, наиболее популярные и известные скоростные поезда в мире. Германия считается страной с наиболее развитой инфраструктурой скоростного движения, имеющей одну из самых разветвленных и протяженных линий железных дорог в мире /17/.

Сейчас по немецким рельсам курсирует около 270 поездов уже третьего поколения (ICE 3), разработанных для Deutsche Bahn AG компаниями Siemens AG и AEG. Конечно же, ICE используются преимущественно на большие расстояния. Кроме них в Германии существуют и скорые пригородные электрички Stadt-Express.



Моторвагонный состав обычно составляется из 8-12 вагонов. О каких же скоростях движения на ICE 3 можно говорить? Средняя скорость движения по маршруту – 160 км/ч, а вот на специально модернизированных участках пути скорость может достигать максимальных 330 км/ч...

Франция

515,3 км/ч – таков мировой рекорд скорости на классической железной дороге, установленный в 1990 году французским экспрессом TGV /19/(Train a Grande Vitesse).



Эти экспрессы, выпускаемые компанией Alstom, обычно состоят из 8 вагонов (345 мест), скрепленных т. н. полужесткой сцепкой. TGV очень популярны во многих европейских странах и имеют несколько модификаций, предназначенных для эксплуатации в конкретном регионе.

Англия и Евротуннель

В островной Англии, на региональных маршрутах, очень популярны поезда Eurostar, пущенные в 1993-1994 гг. Они также используются в знаменитом Евротуннеле – грандиозном подземно-подводном сооружении длиной 50 км, проложенном под проливом Ла-Манш и связывающим Великобританию и континент /18/.



Всего 2 часа 35 минут со средней скоростью движения 298 км/ч займет путешествие из столицы Туманного Альбиона – Лондона в столицу мировой моды – Париж. Стоимость билета на эту поездку составляет 296 евро (первый класс) и 177 евро (второй класс); студенческие и детские билеты дешевле.

Конструктивно Eurostar является французским экспрессом TGV, однако с некоторыми технологическими изменениями. Кроме измененной окраски и дизайна головного вагона, Eurostar вместительнее (за счет добавления дополнительных 10 вагонов) и имеет новейшую систему пожаротушения...

Япония

История скоростного железнодорожного движения этой маленькой страны началась в 1965 году (!), когда специалистами Japan Railways была открыта первая ветка, связавшая два крупнейших мегаполиса – Токио и Осаку. Сейчас на этой линии работает 263 состава.



Время, требуемое для путешествия, составляет 2 часа 52 минуты (при средней скорости движения 220 км/ч и максимальной – 300 км/ч)/17/.

Швеция

Специалисты Министерства путей сообщения Швеции, начавшие еще в 1975 году рассматривать возможности скоростного железного движения, решили пойти по другому пути /17/. По их мнению, принимать участие в «гонке за скоростью» смысла не было – слишком большие затраты. Как известно, движение поездов со средней скоростью свыше 200 км/ч требует создания особого полотна поистине астрономической стоимости.

Их поезд – X 2000 (6 вагонов, 254 места) – создан по технологии гидравлической системы наклона кузовов при прохождении кривых. Это позволяет составу без снижения скорости проходить крутые повороты, и при этом не требуется специальная колея, проложенная с большими радиусами

поворотов. Силовая установка Х 2000 – 4 электродвигателя общей мощностью 3300 кВт. Масса состава – 343 т, длина – 140 м.



Х 2000 курсируют между всеми крупными городами Швеции (Стокгольм, Гетеборг, Мальме), средняя скорость движения – 150 км/ч, максимальная – 210 км/ч. Протяженность линий – около 2500 км...

Швейцария

Швейцарские скоростные поезда ICN производства Fiat SIG начали курсировать между такими городами Швейцарии, как Берн, Женева, Лозанна и Цюрих, в середине 2000 г. Как и шведские коллеги, швейцарцы решили отдать преимущество внедрению бюджетной системы наклона вагонов, а не замене заново всего полотна /19/. Пустив высокоскоростные железнодорожные экспрессы по «старым» рельсам, они снизили расходную часть и установили «неписаный» предел скорости – 200 км/ч. Всего, начиная с 2000 года, в Швейцарии было построено лишь 4 специальных новых магистрали для высокоскоростные железнодорожные экспрессы. Сейчас в Швейцарии курсирует 44 состава. Пассажировместимость каждого из них – 457 человек, которые размещаются в 7 вагонах...

Украина

Желание следовать в Европу на «всех скоростях» в Украине имеет реальные очертания. За последние годы по железнодорожным магистралям «Укрзалізниця» пустила семь пассажирских составов (три из них – известные «Столичные экспрессы»).

Выпуском и модернизацией подвижного состава у нас в стране занимаются ОАО «Крюковский вагоностроительный завод» и Днепропетровский завод по ремонту и строительству пассажирских вагонов. И хотя, по сравнению с мировыми образцами, отечественные поезда лишь с натяжкой можно назвать «скоростными» (максимальная скорость – 140 км/ч, а средняя – 83,7 км/ч), первый и важный шаг «по рельсам» сделан!

Первый «Столичный экспресс» отправился в 2001 году по маршруту Киев – Харьков (протяженность 484 км, время в пути – 5 часов 50 минут). Кроме этой пары поездов, из столицы проложены еще два экспресс-маршрута: Киев – Днепропетровск (530 км, 5 часов 45 минут) и международный Киев – Москва (873 км, 8 часов 30 минут).

Кроме «Столичных экспрессов» существуют и т. н. ускоренные пассажирские поезда. Их четыре: Киев – Сумы (протяженность 351 км, время в пути – 5 часов 07 минут), Киев - Кременчуг (332 км, 4 часа 13 минут), Киев – Хмельницкий (362 км, 4 часа 25 минут) и Киев – Полтава (334 км, 4 часа 00 минут).

На сегодняшний день общая протяженность модернизированных путей, по которым могут двигаться вышеперечисленные поезда, составляет 3266 км.

Будущее? Настоящее!

Технический прогресс не стоит на месте. Будущее высокоскоростного железнодорожного движения – это бесконтактные поезда, использующие в качестве движущей силы магнитную левитацию (magnetic levitation). Такие поезда еще называют «маглевы». «Маглев» обходится без традиционных привычных рельсов – он движется, «обхватив» один центральный рельс. Магниты, установленные на полотне и на самом поезде, под действием

высокого напряжения постоянно меняют свою полярность, то отталкивая, то притягивая корпус поезда к рельсу. Таким образом, до рельса поезд никогда не дотрагивается, а «висит» на магнитной подушке в 10 мм над ним. Отсутствие силы трения и движения каких-либо механических деталей позволяет развивать феноменально надежному «маглеву» скорость до 500-700 км/ч! Немаловажны экологичность и низкий уровень шумности при эксплуатации такого поезда. Кроме того, для «маглева» не нужны мосты и насыпи – путь прокладывается на специальной эстакаде на высоте несколько десятков метров от земли.

С 2004 года состав Shanghai Transrapid компании Shanghai Maglev Transportation Corp. курсирует между Шанхаем (Китай) и международным аэропортом Пудон. Его максимальная скорость достигает 536 км/ч, а средняя – 430 км/ч.

1.2. Из истории скоростного движения поездов

Вся история развития железнодорожного транспорта связана со стремлением к повышению рабочих скоростей движения поездов, обеспечению минимального времени нахождения в пути, увеличению использования провозной способности магистралей и повышению комфортабельности пассажиров /18/.

Еще в 1847 г. в Англии на одном из участков Большой Западной железной дороги протяженностью 92 км пассажирские поезда достигали скорости 93 км/ч. Во Франции в 1890 г. паровоз «Crampton» с поездом массой 157 т развил скорость 144 км/ч. В Германии в 1903 г. первый электрический моторный вагон при испытаниях на участке железной дороги Цоссен—Мариенфельд развил скорость 210 км/ч. В США в 1905 г. паровоз развил скорость 204 км/ч. В 50—60 гг. XX столетия в ряде стран осуществлялись научные исследования и инженерные разработки по созданию высокоскоростных железных дорог, рассчитанных на движение со

скоростями свыше 200 км/ч. В настоящее время высокоскоростные железные дороги обеспечивают не только высокую скорость передвижения, но и более высокий уровень надежности и безопасности, комфорта, экономичности. Суперпоезда, построенные на основе новейших технологий, способные развивать скорость в 300—350 км/ч, успешно конкурируют с автомобильным транспортом и авиацией.

Высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ) в современном понятии — это железнодорожный транспорт, обеспечивающий движение поездов со скоростью более 200 км/ч. ВСНТ осуществляется либо колесным подвижным составом по рельсовому пути, либо бесконтактным способом, когда для тяги и торможения применяется линейный электрический привод, а для создания условий движения — магнитный подвес, так называемый левитирующий транспорт. Для колесного подвижного состава используется традиционный рельсовый путь, в который укладывается, как правило, усиленная путевая решетка, а для левитирующего ВСНТ создается специальная путевая структура. При контактном ВСНТ прокладка пути, как правило, осуществляется на поверхности земли, а иногда возводятся путепроводы. Для левитирующего транспорта обычно строят искусственные сооружения (эстакады), на которых создают путевую структуру со станциями и ограждениями. Стоимость такой путевой структуры значительно выше, чем в случае рельсового транспорта. ВСНТ с магнитным подвесом является наиболее перспективным и экологически чистым, а также самым бесшумным. При его проектировании и определении стоимости строительства и эксплуатации исходят из позитивных влияний на уровень затрат следующих факторов: высокий темп и экономичность сооружения; большая степень стандартизации и взаимозаменяемости элементов и узлов пути, его надежность, стабильность, долговечность; предельная индустриализация изготовления путевых конструкций; возможность механизации и автоматизации процессов сборки, отладки и пуска в эксплуатацию всей системы. Большим преимуществом левитирующего

транспорта по сравнению с контактным является более высокая степень безопасности и возможность максимальной автоматизации движения.

Развитие ВСНТ связано с организацией безостановочных междугородных и пригородных, главным образом пассажирских перевозок при скоростях до 400—500 км/ч, для чего необходим специальный подвижной состав. Особенно выгодно создание бесконтактных систем ВСНТ в крупных городах без нарушения инфраструктуры, например для связи аэропорта с центром. Эффективны такие системы при большой протяженности территории городов, а также в курортных зонах, имеющих большие пассажиропотоки.

1.2.1. Искусственные сооружения

Искусственные сооружения возводятся на пересечениях железных дорог с реками, ущельями, другими дорогами, с обвалоопасными или лавиноопасными участками. К ним относят мосты, виадуки, эстакады, путепроводы, водопропускные трубы, фильтрующие насыпи, лотки, дюкеры, тоннели, подпорные стенки, противообвальные галереи, дамбы, барражи, трансбордеры.

Мосты устраиваются при пересечении железных дорог с реками, каналами, ручьями, ущельями, оврагами. Они бывают каменные, металлические, бетонные, железобетонные и деревянные. Мост (рис. 9.6) состоит из опор и пролетных строений балочной, арочной или висячей конструкции. Они могут быть разводными или подвешенными для пропуска судов на крупных реках. Береговые опоры моста называются устоями, а промежуточные — быками /4, 7, 8/. Нижняя часть устоев, находящихся в земле называется фундаментом, а верхняя часть, на которую устанавливаются пролетные строения, — исходной частью. Конец насыпи вокруг устоев моста называется конусами и обычно тщательно укрепляется от размыва.

Мосты бывают также одно-, двух-, трех- и многопролетными (по числу промежуточных опор). Расстояние в свету между противоположными устоями однопролетного моста называется отверстием моста. В многопролетных мостах отверстием моста является сумма расстояний между отдельными опорами.

Пролетное строение моста состоит из главных ферм, связей между ними, проезжей части и мостового полотна, включающего в себя рельсы, шпалы, балласт, деревянные или металлические поперечины, охранные и противоугонные устройства, боковые тротуары, настил, перила, системы водоотвода, обогрева, освещения. Путь на пролетных строениях укладывается на щебеночном балласте, на деревянных поперечинах или металлических поперечниках (особо крупные металлические мосты), на железобетонных плитах.

При расположении проезжей части моста на уровне верхнего пояса фермы мост называется с «ездой поверху» (рис. 1); при расположении на уровне нижнего пояса — «с ездой понизу» (рис. 2). Мост с ездой посередине показан на рис. 3.

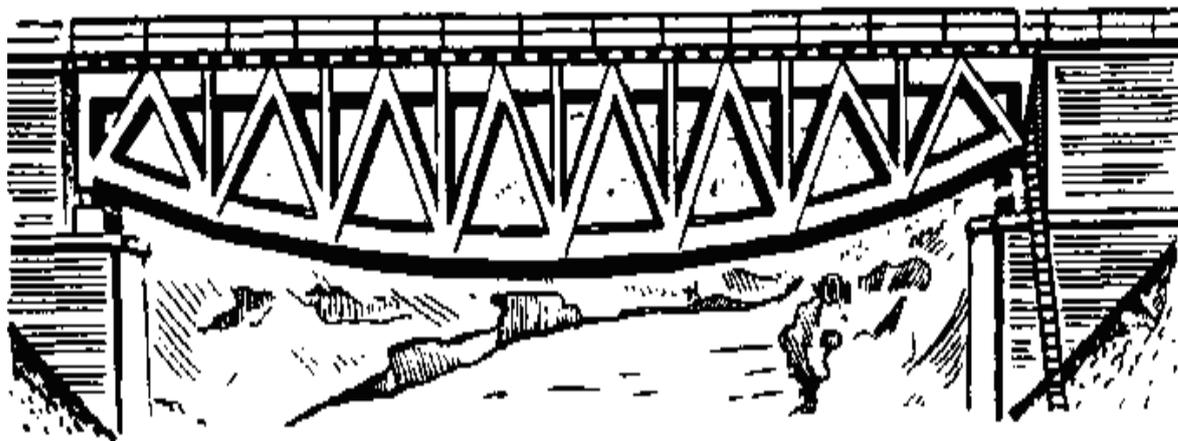


Рис. 1. Мост с «ездой поверху»



Рис. 2. Мост с «ездой низу»

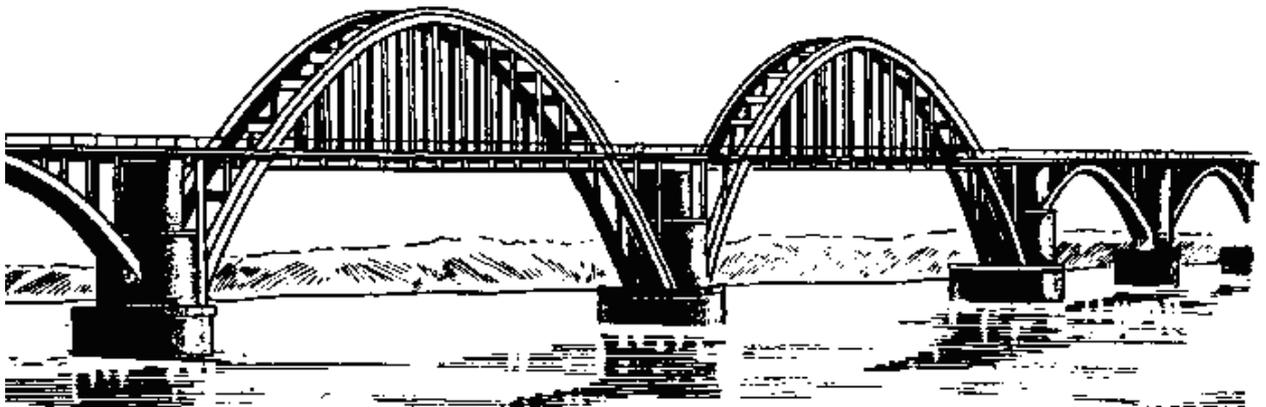


Рис. 3. Мост с «ездой по середине»

1.2.2. Надежность искусственных сооружений

Под надежностью искусственных сооружений понимают их способность обеспечивать в течение всего срока службы безопасный пропуск транспортных средств, пешеходов, водотоков при заданных условиях эксплуатации как собственно искусственные сооружения, так и пересекаемых ими водных транспортных путей.

При проектировании новых и реконструкции существующих ИС их безотказность гарантируется выбором рациональных технических решений (на основе обязательного технико-экономического сопоставления конкурентоспособных вариантов) и соответствующими расчетами по методу предельных состояний, принятому у нас в стране в качестве основного способа оценки надежности искусственные сооружения. Предельные

состояния трактуются как состояния, при которых искусственные сооружения перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям производства работ. Термин «наступление предельного состояния» в этом случае является аналогом термина «отказ».

Различают две группы предельных состояний искусственных сооружений. Первая группа включает состояния, которые ведут к потере несущей способности или полной непригодности к нормальной эксплуатации (полные отказы). К ним относятся: разрушения любого характера (например, пластичные, хрупкие, усталостные); общая потеря устойчивости формы; состояния, при которых необходимо прекратить эксплуатацию вследствие чрезмерных пластических деформаций, сдвигов в соединениях, раскрытия трещин. Ко второй группе относятся предельные состояния искусственных сооружений, затрудняющие нормальную эксплуатацию (частичные отказы) вследствие недопустимых деформаций пролетных строений и опор мостов, обделок тоннелей, чрезмерных колебаний элементов искусственных сооружений и др. При возникновении таких отказов эксплуатация хотя и может быть продолжена, но при определенных ограничениях, например по массе пропускаемых поездов, скорости их движения и т. п.

При расчетах по методу предельных состояний условия обеспечения безотказности искусственных сооружений заключаются в том, чтобы возникающие при эксплуатации усилия в конструкциях не превышали их несущей способности, а вызванные этими усилиями деформации, перемещения, раскрытия трещин и др. не выходили за рамки их предельных допускаемых значений. При таком подходе необходимый уровень надежности искусственных сооружений определяется нормами проектирования, которыми регламентируются прочностные и другие характеристики строительных материалов, уровень нагрузок и воздействий, предельные величины деформаций и др. Эти параметры, устанавливаемые на основе анализа соответствующих статистических данных, прогнозирования силовых воздействий на искусственные сооружения перспективного

подвижного состава, а также практического опыта, представляются в нормах некоторыми детерминированными значениями, а возможное влияние их неблагоприятных изменений на надежность искусственных сооружений учитывается коэффициентами надежности по материалу, грунту, нагрузке, а также по степени ответственности сооружения. Кроме того, в расчет вводятся коэффициенты условий работы, отражающие возможные отклонения принятых расчетных моделей от реальных условий работы элементов искусственных сооружений, а также изменения свойств материалов вследствие влияния температуры, влажности и других факторов, непосредственно не учитываемых расчетом.

Ввиду тяжелых последствий, связанных с выходом искусственных сооружений из строя, их безотказность должна быть достаточно большой, а вероятность наступления отказов – малой. Считается, что вероятность наступления частичных, постепенно развивающихся отказов, должна быть не более 10^{-2} – 10^{-3} ; внезапных полных отказов (хрупкое разрушение, потеря устойчивости и т.п.) – 10^{-7} .

При строительстве искусственных сооружений заложенный в проекте уровень их надежности должен гарантироваться применением строительных материалов, строго соответствующих по своим физико-механическим характеристикам установленным стандартам, а также соблюдением предусмотренных проектом требований к технологическим процессам изготовления и монтажа с обязательным пооперационным контролем качества работ, включая приемочные испытания крупных искусственных сооружений поездной нагрузкой. Особое внимание должно уделяться качеству работ, недоступных для последующего контроля (сооружение фундаментов, армирование конструкций и др.), искусственному регулированию напряжений в конструкциях, устройству различного рода соединений монтажных блоков и частей искусственных сооружений (стыки железобетонных элементов, фрикционные и сварные соединения и др.). Важную роль в обеспечении надежности искусственных сооружений,

являющихся ремонтпригодными объектами, играет система содержания искусственных сооружений в эксплуатации, представляющая собой комплекс мероприятий и работ, осуществляемых на протяжении всего срока службы сооружений и состоящих из текущего содержания и капитального ремонта. Текущее содержание включает надзор за состоянием искусственных сооружений (осмотры, обследования, специальные наблюдения и испытания) и проведение необходимых ремонтных работ по предупреждению появления и устранению на ранней стадии развития возникающих повреждений. При капитальном ремонте заменяют отдельные изношенные части и элементы, устраняют негабаритности, осуществляют реконструкцию и усиление сооружений и др.

Большинство железнодорожных мостов построено по старым нормам проектирования. Для обеспечения их надежности важна применяемая на отечественных железных дорогах единая система классификации мостов по их грузоподъемности (по условиям прочности, устойчивости и выносливости всех несущих элементов), а подвижного состава (обращающегося и перспективного) – по воздействию на мосты. Сопоставление классов элементов искусственных сооружений и подвижного состава позволяет судить о возможности и условиях безопасного пропуска по искусственным сооружениям различных поездов, устанавливать режимы эксплуатации (в том числе допускаемые скорости движения поездов), принимать решения о необходимости усиления слабых элементов искусственных сооружений или их замены новыми. В отдельных случаях (например, при оценке усталостной прочности мостов) определяется остаточный усталостный ресурс.

Долговечность искусственных сооружений зависит от многих факторов, главными из которых являются: уровень приданных сооружению при проектировании запасов (резервов) по грузоподъемности, водопропускной способности и другим параметрам, обеспечивающим работоспособность искусственных сооружений в меняющихся и трудно прогнозируемых перспективных условиях эксплуатации; интенсивность роста во времени

силовых воздействий на искусственные сооружения подвижного состава (главным образом за счет увеличения осевого и погонного давления на путь, грузонапряженности дорог, скорости движения поездов), неблагоприятных изменений гидрологического режима водотока и других характеристик эксплуатации до соответствующих исчерпанию имеющихся в сооружении резервов. Важное значение в продлении срока службы искусственных сооружений имеют качество текущего содержания и своевременность проведения работ по их усилению и реконструкции.

Путевое хозяйство: как расширять узкие места?

Октябрьская железная дорога всегда на виду. И не только потому, что связывает две российские столицы. В числе первых на этой магистрали приживается все передовое, получают развитие многие технические и технологические начинания, служащие прогрессу всей отрасли.

Владимир Анатольевич Богданович посвятил свое выступление "обыденной", рабочей стороне достижений и сопряженным с ними проблемам. Остановился он на четырех - злободневных для путевого хозяйства Октябрьской железной дороги, заместителем начальника которого он является.

1.2.3. Современные требования к искусственным сооружениям: надежность, безопасность, долговечность

Железнодорожные искусственные сооружения и земполотно требуют к себе особого внимания в вопросах содержания, капитального ремонта и реконструкции. О мерах по улучшению состояния и содержания железнодорожных искусственных сооружений и земляного полотна должна идти речь в в управлении ГАЖК.

Несмотря на целенаправленное проведение работ по реконструкции и ремонту, на сети железных дорог продолжает эксплуатироваться значительное число дефектных и не соответствующих современным нормам

сооружений. Например: 28% железнодорожных тоннелей, 19% автодорожных путепроводов на балансе дистанций пути, 16% пешеходных мостов, 11% больших мостов отнесены к категории дефектных сооружений.

В отличие от других элементов железнодорожной инфраструктуры инженерные сооружения рассчитаны на наиболее длительный срок эксплуатации. Однако установленный при массовом железнодорожном строительстве в России и странах СНГ и казавшийся вполне достаточным нормативный срок эксплуатации в 100 лет к настоящему времени уже существенно превышен значительным числом сооружений. До сих пор в эксплуатации на главных железнодорожных направлениях находятся сооружения, построенные в период с 1861 по 1907 годы под поездные нагрузки, существенно меньшие действующих сейчас. Доля таких сооружений составляет 30% от общего количества эксплуатирующихся мостов, водопропускных труб, земполотна и имеет тенденцию к увеличению в ближайшие годы. На сети железных дорог России и странах СНГ еще продолжают эксплуатироваться около 1100 металлических пролетных строений спроектированных по нормам 1907 года и более ранних, общим весом 50 тыс. т.

В силу происходящих в последние годы климатических и гидрологических изменений осложняются условия эксплуатации земполотна, также построенного более века назад. За период с 2006 по 2010 год имел место 31 случай схода снежных лавин на железнодорожный путь с общим перерывом движения более 150 часов. Потепление климата начинает также негативно влиять на состояние земполотна, расположенного на многолетнемерзлых грунтах. Активное оттаивание грунтов основания насыпей приводит к повышенной деформативности земполотна. При этом предлагаемые меры по сооружению охлаждающих контуров, каменных набросок не в полной мере решают задачу обеспечения стабильности земполотна на многолетнемерзлых грунтах.

Кризисные явления в экономике привели к резкому (2,3 раза), падению объемов работ по оздоровлению инженерных сооружений. Такое положение сохраняется на протяжении 2009 и 2010 годов. Существенного улучшения не ожидается и в 2011 году. Если снижение объемов в 2009 году в силу большого количества земельных работ не было заметно, то в 2010 году снижение стало более чем очевидно. Суммарный объем замены дефектных металлических пролетных строений в 2010 году по сравнению с 2009 годом упал в 5,3 раза с 28,4 тыс. т до 5,4 тыс. т. Укладка безбалластного мостового полотна по всей сети сократилась в 2,2 раза с 3900 куб. м до 1800 куб. м, что сопоставимо с объемами работ по БМП на одной только Московской железной дороге в 1999–2001 годах, выполнявшей укладку 1500–1600 куб.м. ежегодно. Значительные сокращения произошли по всем видам ремонтных работ. Как следствие, в 2010 году впервые за 10 лет отмечен рост дефектности сооружений, что говорит о весьма ограниченном остаточном ресурсе надежности ряда сооружений. Прежде всего это касается опор мостов, кирпичных и каменных водопропускных труб постройки до 1907 года, на большинстве которых за все время эксплуатации не проводилось работ по капитальному ремонту и усилению. Сооружения, выслужившие более нормативного срока эксплуатации, подлежат безусловному переустройству, но пока возможности компании ограничены, на первый план выходит требование максимально эффективного управления имеющимися средствами. Для этого необходимо привести существующую систему надзора и содержания искусственных сооружений и земполотна к требованиям настоящего момента.

Обновленная система содержания инженерных сооружений должна основываться на:

– оперативной и качественной диагностике стареющих сооружений сети железных дорог, обязательная оценка остаточного эксплуатационного ресурса для каждого сооружения;

- едином методическом подходе к проведению обследований и испытаний;
- единой автоматизированной системе обработки результатов обследований;
- определению оптимальной стратегии проведения работ по оздоровлению сооружений, предусматривающей также выбор оптимального соотношения между текущим содержанием, капитальным ремонтом и реконструкцией;
- более профессиональном выполнении работ по текущему содержанию и ремонту силами специализированных организаций.

Имеющаяся система содержания и надзора за инженерными сооружениями находится в крайне неудовлетворительном состоянии. Среднесетевая численность мостового цеха дистанции пути не превышает 10 человек, оснащенность инструментом и оборудованием для ремонта и содержания искусственных сооружений составляет 13% от необходимого. В таких условиях обеспечить качественное содержание искусственных сооружений, эксплуатирующихся уже за пределами нормативного срока эксплуатации и в которых все чаще возникают все более сложные и серьезные дефекты, представляется маловероятным. Имеющаяся статистика подтверждает этот тезис. Из года в год при проведении весеннего и осеннего комиссионных осмотров выявляется примерно одинаковое количество неисправностей искусственных сооружений, из которых до следующего осмотра устраняется до 50% неисправностей. При таком проценте реального устранения неисправностей была бы отмечена тенденция к общему их снижению, но этого не происходит. Это свидетельствует о том, что прежде всего отрабатываются легкоустраняемые и малозначимые неисправности, а серьезные дефекты остаются неустраненными, продолжают развиваться и снова фиксируются при очередном осмотре. Такой вывод подтверждается результатами проверок текущего содержания искусственных сооружений, проводимых Центром ИССО на железных дорогах. Практически в каждом

отчете о проведенной проверке отмечается низкий уровень текущего содержания.

Из анализа текущего содержания Департаментом пути и сооружений сделан вывод о неэффективности существующей системы содержания инженерных сооружений и необходимости ее серьезного изменения. На ежегодной сетевой школе по обмену опытом реконструкции, капитального ремонта и содержания искусственных сооружений и земляного полотна, проведенной в сентябре 2009 года на Дальневосточной железной дороге, был рассмотрен вопрос создания на железных дорогах специализированных подразделений по содержанию и ремонту искусственных сооружений. К настоящему времени готовность к созданию дистанций пути по искусственным сооружениям и переходу к новой системе содержания, предусматривающую большую мобильность, концентрацию сил и средств и техническую оснащенность, адекватную состоянию инженерных сооружений, подтвердили большинство железных дорог сети, причем сделано это без какого-либо давления со стороны Департамента пути и сооружений, что свидетельствует о понимании руководителями путевого хозяйства железных дорог необходимости перемен в содержании инженерных сооружений.

Неудовлетворительная обстановка сложилась в последние годы и с диагностикой инженерных сооружений. Старение сооружений и отсутствие достаточного для их реконструкции финансирования ставит перед диагностикой искусственных сооружений и земляного полотна значительно более сложную задачу – перейти от констатации факта наличия дефектов к оценке долговечности и надежности сооружения, к определению его остаточного эксплуатационного ресурса. Это позволит Департаменту пути и сооружений и службам пути железных дорог более эффективно управлять имеющимися средствами, направляя их на действительно первоочередные объекты, и оптимизировать затраты на содержание и ремонт искусственных сооружений.

Для решения этой задачи прежде всего необходимо оснастить 27 дорожных мостоиспытательных станций и 17 инженерно-геологических баз современным диагностическим оборудованием, обеспечить мобильными средствами доставки и создать единую систему автоматизированного управления хозяйством инженерных сооружений, основанную на оценке надежности сооружений – то есть систему, способную определять вероятность безотказной работы сооружения, их долговечность и ремонтпригодность, позволяющую прогнозировать изменение состояния сооружения во времени. Имеющиеся разработки СГУПС в части балльной оценки состояния и содержания искусственных сооружений и земполотна создают хорошие предпосылки для разработки современной системы оценки и управления рисками в хозяйстве инженерных сооружений ГАЖК «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ». Необходимо адаптировать балльную оценку к требованиям сегодняшнего дня по параметрам безотказности, ремонтпригодности, безопасности и долговечности. А в целом подход СГУПС к оценке состояния сооружений соответствует общепринятой мировой практике. Также на балльной оценке основаны, с различными вариациями по количеству баллов, системы управления сооружениями в США, Германии, Франции, ряде других стран ЕС, Японии.

Оснащение дорожных мостоиспытательных станций и инженерно-геологических баз современными вагонами-лабораториями, начатое по инициативе департамента пути и сооружений в текущем году, будет продолжено в 2011–2015 годах. В рамках инвестиционного проекта «Строительство и реконструкция искусственных сооружений» на железные дороги будет направляться не менее 5 лабораторий ежегодно. К формированию необходимого комплекса оборудования и инструментов для вагонов-лабораторий были привлечены ведущие специалисты НИИ Мостов, ВНИИЖТ, СГУПС, МИИТ и Центра ИССО, что позволило обеспечить выбор самых современных технических средств диагностики. В комплекс оборудования входят: универсальная компьютерная система сбора и

обработки данных Quantum X, магнитный структуроскоп для оценки остаточного ресурса металлических конструкций, ферроскан для определения армирования в железобетонных конструкциях, стационарные и полевые лаборатории для определения свойств грунта, георадары и комплект электроразведочной и сейсмоаппаратуры, электронные тахеометры для геодезических работ и ряд других необходимых для диагностики приборов и инструментов. Это позволит решить вопрос обновления диагностики на уровне железных дорог сети и создаст основу для формирования качественной базы данных для системы управления инженерными сооружениями. По оснащению дорожные мостостанции и геобазы должны выйти на уровень подразделений Центра ИССО и тем самым будут созданы условия для формирования в рамках кампании единой системы диагностики искусственных сооружений и земполотна. При появлении новых технологий неразрушающего контроля инженерных сооружений и нового диагностического оборудования соответствующие изменения будут вноситься в комплекс диагностических лабораторий мостостанций и геобаз. Оснащение диагностических подразделений современными техническими средствами и, соответственно, возможность получения оперативной, качественной и максимально достоверной информации о сооружении являются основой системы управления инженерными сооружениями.

Следует отметить, что в текущем году создана мостоиспытательная станция на Калининградской железной дороге и, таким образом, после надлежащего оснащения этой мостоиспытательной станции квалифицированной диагностикой будут охвачены все сооружения сети.

Важнейшую роль в процессе формирования единой системы управления инженерными сооружениями Департамент пути и сооружений отводит Центру обследования и диагностики инженерных сооружений – филиалу ОАО «РЖД». Центр ИССО является единственной в системе ОАО «РЖД» структурой, располагающей необходимой технологической базой и квалифицированными кадрами, специализированными в области проведения

обследований инженерных сооружений в масштабе сети железных дорог. Процесс создания системы управления рисками в хозяйстве инженерных сооружений должен направляться и контролироваться со стороны такой организации, располагающей значительной статистической информацией по инженерным сооружениям и формирующей ежегодную общесетевую базу данных о состоянии искусственных сооружений и земляного полотна.

Для обеспечения работы по созданию и дальнейшему сопровождению автоматизированной системы управления инженерными сооружениями скорее всего потребуются сформировать в Центре ИССО (в пределах его штатной численности) отдел, а возможно, и не один, в задачи которого будет входить анализ и ввод данных, необходимых для вычисления параметров надежности, контроль и обеспечение полноты и достоверности данных, поступающих с железных дорог, методическое руководство работой дорожных мостостанций и геобаз. Эту работу Центр ИССО должен будет осуществлять совместно со СГУПС, которому отводится роль основного разработчика системы.

Еще одним из направлений повышения эффективности содержания инженерных сооружений является внедрение современных ресурсосберегающих технологий, малообслуживаемых конструкций и более долговечных материалов. За последний год департаментом пути и сооружений рекомендованы к применению прогрессивные конструкции малообслуживаемых мостовых опорных частей с шаровым сегментом, металлические пролетные строения пролетом до 110 м с балластным корытом, долговечное гидроизоляционное покрытие из полимочевины, современные полиуретановые системы лакокрасочных покрытий, деформационные швы для пролетных строений с ездой на балласте, конструкция усиления основной площадки земляного полотна объемной георешеткой, на участках высокоскоростного движения применено полимерное покрытие балластной призмы, исключая повреждение колесных пар щебнем. Принято решение о применении при проектировании

железнодорожных тоннелей замкнутой гидроизоляции и устройстве в тоннелях безбалластного пути на демпфирующих матах. В текущем году будет откорректирована нормативная база по квалификации затрат при капитальном ремонте и реконструкции.

В следующем году планируется завершить разработку и начать опытную укладку современной контрольно-оповестительной сигнализации на карстоопасных участках, разработать малозатратную технологию усиления земполотна на карстоопасных участках, начать внедрение системы предупреждения о неблагоприятных погодных условиях на лавиноопасных участках. Применить закрепление каменно-набросных бун полимерным материалом. В связи с необходимостью строительства большого количества пешеходных мостов на высокоскоростных направлениях планируется разработать малозатратные и быстровозводимые мостовые конструкции. Планируется начать опытную эксплуатацию цельносварного (безболтового) пролетного строения.

Реализация намеченных мер по модернизации системы содержания и диагностики, внедрение инновационных технологий и материалов при ремонте и обновлении искусственных сооружений и земполотна должны обеспечить приведение комплекса железнодорожных инженерных сооружений к современным требованиям по надежности, безопасности, долговечности и обеспечить безопасность движения поездов с требуемыми скоростями.

1.3. Сложности содержания пути на высокоскоростных участках

Развернутая длина главных путей Октябрьской дороги составляет 13 325 километров. На участке Санкт-Петербург - Москва на 986 километрах скоростного хода поезда развивают до 200 километров в час, а еще на 210 километрах - свыше 140. Поставлена задача увеличить полигон скоростного

движения, приблизиться к показателю 250 километров в час (первый этап - на участке Мстинский Мост - Бологое).

Применительно к пути для высокоскоростного движения мы имеем пока только основные требования и критерии. Нет нормативов и необходимой документации на ремонт и содержание рельсовой колеи при скоростях более 200 км/час, элементов верхнего строения пути, по эксплуатации и проверке рельсов, скреплений, шпал, плетей бесстыкового пути, стрелочных переводов и т.д., из-за чего приходится сталкиваться сегодня с рядом трудностей.

Остро встают вопросы, прежде всего касающиеся нормативов на содержание и ремонт пути и сооружений; конструкции пути и качества поставляемых элементов верхнего строения; подготовки к высокоскоростному движению земляного полотна, водоотводов и стрелочных переводов; качества используемого балласта.

Не определена нормативная система эксплуатации высокоскоростного участка. Есть стандарт (СТО РЖД 1.07.001-2007), есть понимание, какой должна быть его конструкция, но возникла проблема - как содержать его в текущей эксплуатации?

С проблемой не справиться, не проработав вопросы о нормах эксплуатации; о характеристиках кривых (в частности, о минимальном радиусе); о допусках на наибольшее непогашенное центробежное ускорение кузова вагона в кривых; о максимально допустимом вертикальном и горизонтальном ускорении кузова; об увеличении междупутного расстояния. Я перечислил далеко не все...

К сожалению, мы не владеем инструментальными методами контроля динамического взаимодействия между путем и скоростным подвижным составом. Нет и соответствующих нормативов. Промеры пути на скоростных участках осуществляются дорожными мастерами вчерашним днем - с помощью шаблонов ЦУП и приборов ПРП. Плавность хода скоростного поезда определяется только "пассажирским самоощущением" руководителя путевого хозяйства, который в голове локомотива сопровождает поезд.

Проведенные на участке Санкт-Петербург - Москва еще в августе 2004 г. акселерометрические обследования выявили множество отступлений (более 100 мест) по величине вертикального и горизонтального ускорения кузова вагонов поездов "ЭР-200" и "Невский экспресс". Более половины приходится на стрелочные переводы, процентов 15 - на кривые и участки подходов к искусственным сооружениям.

Если мы хотим надежно содержать высокоскоростной участок, прежде всего надо определиться, какой должна быть конструкция пути. Под требуемые объемы укладки пути необходимо иметь современные технологии и набор машин. Без этого не создать полного и законченного комплекса механизированного содержания скоростного участка.

Применяемые ныне элементы верхнего строения пути не удовлетворяют требованиям, предъявляемым при высокоскоростном движении. Поставляемые на дорогу рельсы отечественного производства (даже СС) не соответствуют по качеству и геометрии (прямолинейности). Собранные за десять лет на направлениях Санкт-Петербург - Москва и Санкт-Петербург - Выборг статистика показала: импортные (японские) рельсы работают стабильнее отечественных, они лучше по качеству изготовления, реже выходят из строя в связи с недостатками эксплуатации.

При укладке рельсов с нарушенной геометрией потребуются усиленная их шлифовка. Располагая сегодняшним парком рельсошлифовальных поездов, мы будем вынуждены ограничиваться только высокоскоростными участками. Шлифовка на других фронтах капитальных работ окажется просто-напросто невозможной из-за нехватки машин типа SPENO.

Полтора с лишним десятка лет дорога пытается решить проблему ликвидации стыков на линии Санкт - Петербург - Москва. Однако наших девяти передвижных рельсосварочных машин ПРСМ едва хватает на то, чтобы выполнять технологию при капремонте пути и ликвидации мест временного восстановления, не допуская их прироста.

Рельсовые скрепления для высокоскоростного участка должны иметь более высокие качественные показатели, установленные по отдельным техническим требованиям. Скрепления должны быть упругими, но сегодня в нашей стране к таким относится только скрепление АРС. Да и то наш пятилетний опыт их эксплуатации показал: некоторые элементы АРС служат слишком недолго.

На участках, где планируется повышение скоростей движения, предварительно необходимо производить изменения жесткости подрельсового основания, особенно тщательно на подходах к искусственным сооружениям и стрелочным переводам (т.е. необходимы соответствующие нормативы и специальное измерительное оборудование).

До введения высокоскоростного движения на дороге нужно выполнить комплекс мероприятий по усилению земляного полотна, обеспечению надежного функционирования водоотводных сооружений, исключению пучинообразования, просадок, деформаций откосов насыпей и выемок.

Если выправка пути под высокоскоростное движение производится машинами Дуоматик 09-32 с обязательной стабилизацией пути динамическим стабилизатором ДСП, то на стрелочных переводах, уложенных в главный путь, применяются только машины Унимат 08-475. Нужен комплекс для динамической стабилизации стрелочных переводов.

Эксплуатируемые стрелочные переводы проектов 2726/2728 не обеспечивают требуемые показатели по ширине рельсовой колеи и надежности для скоростей свыше 200 км/час. Необходимо их доработать или заменить.

В этом году во ВНИИЖТ создан стрелочный перевод для высокоскоростного движения, в Новосибирске выпущен его пробный комплект. Принято решение уложить его на экспериментальном кольце. Опытная эксплуатация покажет, годится ли новинка для укладки в главный путь.

Участки высокоскоростной инфраструктуры должны быть выделены из общей структуры путевого хозяйства. Придется пересмотреть формы организации текущего их содержания и оснастить малогабаритными высокопроизводительными машинами и механизмами, средствами диагностики, позволяющими минимизировать участие человека в процессах ремонта и измерений.

1.3.1. Содержание малодеятельных участков

Решая проблемы высокоскоростных и грузонапряженных ходов, мы отвлекаем на них практически сто процентов ремонтного фонда. Поэтому для малодеятельных участков остается только текущее содержание.

Это участки 1915-1940 годов постройки: Тихвин - Будогощь, Ручьи Карельские - Алакурти, Земцы - Жарковский и другие. Капитальный ремонт не производился в течение всего периода их эксплуатации - менялись лишь шпалы, да иногда рельсы. На ряде участков лежат рельсы Р43, 1а, 2а и 3а типов. Движение на некоторых из них осуществляется один-два раза в неделю составами из двух-трех вагонов.

Такие малодеятельные участки для Октябрьской железной дороги убыточны, но вопросы обеспечения безопасности движения по ним стоят очень остро. Чтобы обеспечить надежность и безаварийность, мы должны изыскивать средства и переводить участки на железобетонную конструкцию (для нашей дороги это 2,8-3,0 тысячи километров), осуществляя капитальный ремонт на старогодных материалах (стоимость КРС 1 км пути составляет 3317,3 тысячи рублей). Для полного перевода на железобетонную конструкцию надо потратить 9,3-9,9 миллиардов рублей.

С учетом первоочередного ремонта на скоростных и грузовых ходах дорога может позволить себе укладывать в год на малодеятельных участках по 10-15 километров железобетонной рельсошпальной решетки. Исходя из таких объемов укладки, проблему удастся решить только через 250 лет!

Минимальные траты на текущее содержание таких участках рано или поздно обернутся невозможностью обеспечить безопасность движения и неизбежным закрытием движения. А это болезненно воспринимается в регионах, где нет другого транспортного сообщения.

Необходимо законодательное решение на уровне правительства о переходе на дотационное содержание малодеятельных участков за счет средств федеральных и местных бюджетов.

1.3.2. Проблема крупных железнодорожных узлов

На крупных узлах дороги много участков с деревянными вставками, где конструкция пути не соответствует условиям эксплуатации (отличается от типовой или требуемой). Требуется замена вставок. Путьевые машинные станции (ПМС) не решают этой проблемы - им невыгодно делать малые объемы в стесненных условиях тяжелой техникой.

Целесообразно создавать мобильные мини-ПМС для ликвидации таких узких мест. При этом надо разработать новые технологии, отличные от зафиксированных в существующих нормативных документах, и условия по премированию производительности. Необходимо оснащать мини-ПМС производительной мобильной техникой для работы в стесненных условиях, без снятия напряжения в контактной сети, без нарушения габарита по соседнему пути. Такие механизмы имеются, но пока в ограниченном количестве (например, самоходные комплексы типа PUM для смены стрелочных переводов и коротких участков пути).

Сегодня в нашем распоряжении высокопроизводительные машины последнего поколения. Однако при этом имеются пробелы во всех

технологических цепочках капитального ремонта пути. В условиях роста интенсивности движения поездов и грузонапряженности проведение качественных работ с соблюдением существующих технологий становится практически невозможным.

Нужны новые машины, которые эти пробелы заполнят и позволят поднять качество работ на соответствующую запросам времени высоту за более короткие "окна".

Выводы по первой главе

1. Отсутствие инструментальных методов контроля динамического взаимодействия между путем и скоростным подвижным составом.

2. Отсутствие соответствующих нормативов.

3. На участках, где планируется повышение скоростей движения, предварительно необходимо производить изменения жесткости подрельсового основания, особенно тщательно на подходах к искусственным сооружениям и стрелочным переводам.

4. Импортные (японские) рельсы работают стабильнее Российских, они лучше по качеству изготовления, реже выходят из строя в связи с недостатками эксплуатации.

5. Применяемые ныне элементы верхнего строения пути не удовлетворяют требованиям, предъявляемым при высокоскоростном движении.

6. Остро встают вопросы, прежде всего касающиеся нормативов на содержание и ремонт пути и сооружений; конструкции пути и качества поставляемых элементов верхнего строения; подготовки к

высокоскоростному движению земляного полотна, водоотводов и стрелочных переводов; качества используемого балласта.

ГЛАВА II. ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА НЕСУЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОСТОВ И СООРУЖЕНИЙ.

2.1. Свободные и вынужденные колебания систем с одной степенью свободы.

Краткие сведения из теории

Системами с одной степенью свободы, называют такие, у которых для полной фиксации их геометрического состояния в любой момент времени достаточно знать лишь один параметр, например положение определенной точки.

Классическим примером системы с одной степенью свободы является невесомая упругая балка (пружина, вал) с одной сосредоточенной массой, имеющей возможность перемещаться в одном только направлении (рис. 1, а—в). При колебаниях такой массы перемещения всех точек балки будут определяться перемещениями указанной массы, но характер перемещений (упругая кривая балки, диаграмма перемещений точек оси пружины) не

будет связан с динамическими качествами системы и может быть определен обычными статическими методами.

Известным приближением к такой расчетной схеме может быть реальная балка с установленным на ней тяжелым грузом (мотор и т. п.), по сравнению с которым весом балки можно пренебречь.

Системой с одной степенью свободы может быть механизм, состоящий из нескольких масс (рис. 1, г), укрепленных на жесткой недеформируемой балке, имеющей возможность вращаться относительно определенного центра (шарнирная опора)? балка подперта несколькими пружинами, массой которых по сравнению с массами M_1, M_2, M_3 можно пренебречь. В таком случае для полной фиксации в любой момент времени геометрического состояния системы (любой массы, любой точки, взятой на пружине, и т. д.) достаточно знать один параметр — угол поворота жесткой балки.

К задаче с одной степенью свободы можно привести изучение радиальных колебаний тонкостенного цилиндра, симметричных относительно его оси (рис. 1, д). В этом случае для определения в любой момент времени геометрического состояния стенок цилиндра достаточно знать всего лишь один параметр: радиальное перемещение любой точки.

При толстых стенках цилиндра отдельные слои их могут иметь в каждый момент времени различные радиальные перемещения (за счет деформации стенок в радиальном направлении), но изменением толщины тонких стенок во время колебаний по сравнению с амплитудой колебаний можно пренебречь и таким образом система сводится к задаче с одной степенью свободы.

Реальные инженерные сооружения обычно далеки от системы с одной степенью свободы. Однако для практических целей ряд задач по динамическому расчету может быть заменен изучением эквивалентной по

окончательным результатам, специально подобранной системы с одной степенью свободы. На основании указанных соображений изучение колебаний систем с одной степенью свободы составляет одну из важных глав динамики сооружений.

Если нарушить равновесие системы с одной степенью свободы, то при отсутствии сил сопротивления система будет совершать свободные колебания по гармоническому закону:

$$y = y_0 \cos \omega t + (v / \omega_0) \sin \omega t, \quad (1)$$

$$v = v_0 \cos \omega t - y_0 \omega \sin \omega t, \quad (2)$$

где y и v — перемещение и скорость массы в момент времени y_0 и v_0 — начальное отклонение и скорость массы в момент времени $t=0$; ω — круговая частота, т. е. число колебаний в 2π секунд.

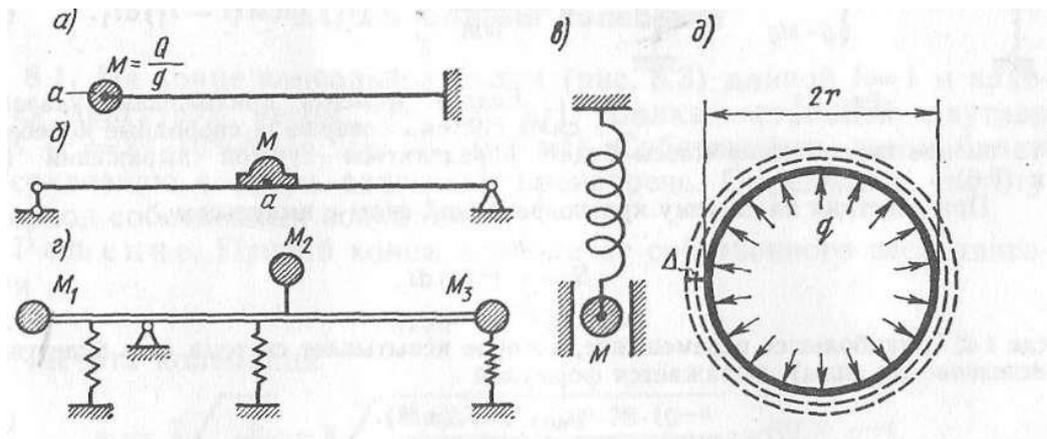


Рис. 1. Система с одной степенью свободы, имеющая возможность перемещаться в одном только направлении

Перемещения y и y_0 в формулах (1) и (2) отсчитываются от того состояния, в котором находилась масса к моменту начала колебательного процесса, т. е. от статического уровня.

Амплитуда перемещений зависит от начальных условий движения и выражается формулой

$$y_{\max} = \sqrt{y_0^2 + (v_0 / \omega)^2}. \quad (3)$$

Круговая частота определяется одним из следующих выражений:

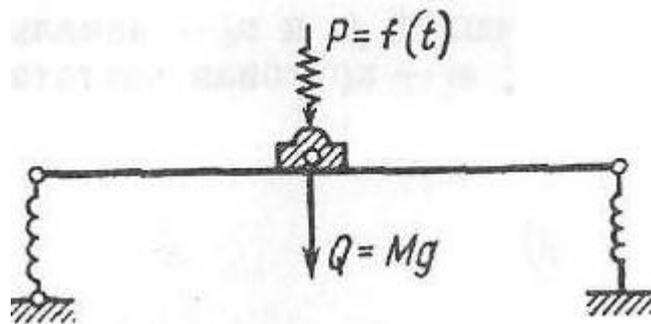


Рис. 2. Схема вынужденных колебаний системы

$$\omega = \sqrt{c/M} = \sqrt{cg/Q} = \sqrt{g/y_{ст}} = \sqrt{1/(M \delta_{aa})}. \quad (4)$$

Здесь $y_{ст}$ — статическое перемещение (прогиб), т. е. перемещение массы в заданном направлении под влиянием действующей в этом направлении силы, равной по величине собственной силе тяжести; c — жесткость системы, т. е. сила, вызывающая при ее статическом приложении единичное безразмерное перемещение; $M=Q/g$ — сосредоточенная масса; δ_{aa} — податливость системы, т. е. статическое перемещение точки прикрепления массы от безразмерной единичной силы, приложенной в той же точки, в направлении этой силы (эти перемещения в дальнейшем будет называть «возможными»).

Круговая частота ω и период T (продолжительность одного цикла колебаний) связаны зависимостью

$$T = 2\pi/\omega. \quad (5)$$

Число колебаний в одну минуту (техническая частота) определяется выражением $f_T = 60/T$.

Период свободных колебаний и связанная с ним частота колебаний являются главнейшими динамическими характеристиками конструкций.

Если нагрузка нарастает или вообще претерпевает изменения в промежуток времени, составляющий менее двух-трех периодов свободных колебаний, то такая нагрузка по отношению к сооружению будет считаться динамической или быстро изменяющейся.

Если же нагрузка нарастает или изменяется в течение времени равного 5—10 и больше периодам свободных колебаний, то эффект таких нагрузок будет близок к статическому.

При действии на массу силы, которая изменяется во времени по какому-либо закону $P=f(t)$, система будет совершать вынужденные колебания (рис. 2). В таком случае перемещение массы в момент времени t будет определяться выражением

$$y = \frac{1}{\omega M} \int_0^t f(t_1) \sin \omega t(t-t_1) dt_1. \quad (6)$$

Если к моменту приложения указанной силы система совершала свободные колебания, то полное перемещение массы будет определяться суммой выражений (1) и (6).

При действии на систему кратковременной силы с импульсом

$$S = \int_0^t P(t) dt,$$

где $t \ll T$, наибольшее перемещение, которое испытывает система (это будет после исчезновения силы), выражается формулой

$$y_{\max} = S/(\omega M). \quad (7)$$

Этому перемещению соответствует эквивалентная статическая сила

$$P_{\text{экв}} = S\omega.$$

При наличии в системе малых сил затухания, пропорциональных первой степени скорости движения, что характерно для строительных конструкций, уравнение свободных колебаний записывается в виде

$$y = e^{-\varepsilon t} \left[y_0 (\cos \omega_1 t + \frac{\varepsilon}{\omega_1} \sin \omega_1 t) + \frac{V_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right], \quad (8)$$

где частота $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \varepsilon^2}$, период $T = 2\pi/\omega_1$, $\varepsilon = \alpha/(2M)$ (здесь α — коэффициент сопротивления — сила сопротивления, развиваемая при скорости движения, равной единице); ω — частота свободных колебаний при отсутствии сил сопротивления.

При действии на такую систему возмущающей силы перемещение записывается так:

$$y = \frac{1}{\omega_1 M} \int_0^t e^{-\varepsilon(t-t_1)} f(t_1) \sin \omega_1(t-t_1) dt_1. \quad (9)$$

При продолжительном действии возмущающей силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону $P_1 = P \sin \theta t$ (весьма распространенный случай), как показывает исследование выражения (9), система будет

совершать колебания с частотой θ возмущающей силы (установившийся режим), причем периодически повторяемые наибольшие амплитуды $y_{\max}(\tau)$ будут связаны со статическими следующей зависимостью $y_{\max}(\tau) = \mu y_{\text{ст}}(p)$ где $y_{\text{ст}}(p)$ — статическое перемещение от наибольшего значения возмущающей силы, т. е. от P , а μ — коэффициент динамичности, определяемый выражением

$$\mu = 1 / \sqrt{[1 - (\theta / \omega)^2]^2 + (\theta / \omega)^2 (2\varepsilon / \omega)^2}.$$

При пренебрежимо малых сопротивлениях и вообще в зонах, удаленных от резонанса (когда θ значительно отличается от ω), можно полагать

$$\mu = 1 / [1 - (\theta / \omega)^2]. \quad (10)$$

Коэффициент динамичности для перемещений одновременно является коэффициентом динамичности и для напряжений, т. е. $\sigma_{\text{дин}} = \mu \sigma_{\text{ст}}$. В системах со многими степенями свободы коэффициенты динамичности по напряжениям и по перемещениям различны.

При крутильных колебаниях расчетные формулы можно получить из (1) — (9), заменив y и y_0 на φ и φ_0 — углы закручивания в моменты t и t_0 ; v и v_0 на $\dot{\varphi}$ и $\dot{\varphi}_0$ угловые скорости вращения в моменты t и t_0 ; M на J — момент инерции массы относительно оси вращения.

Рассмотрим пример. На левом конце двухопорной невесомой балки на жестком рычаге ($EJ_1 = \infty$) высотой h сосредоточена масса M (рис. 3, а). Определить частоту собственных колебаний балки.

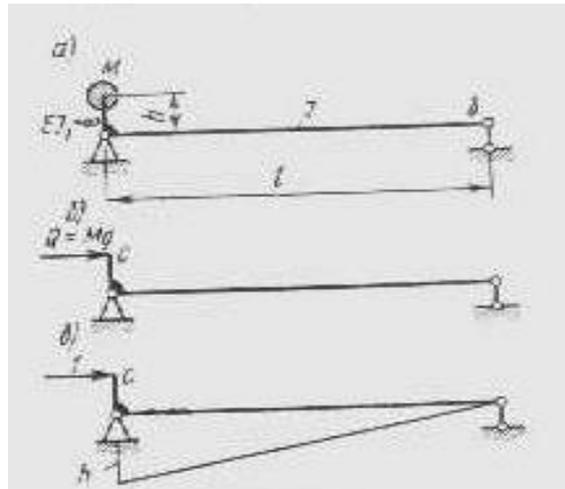


Рис. 3.

Р е ш е н и е: Так как масса M совершает вращательное движение относительно точки (в плоскости балки), то можно воспользоваться формулой для частоты крутильных (вращательных) колебаний: $\omega = \sqrt{c/J}$, где: c – момент пары, необходимый для создания единичного угла поворота; J – момент инерции массы относительно оси вращения.

Из известной формулы сопротивления материалов для угла поворота опорного сечения двухопорной балки от момента, приложенного в том же сечении: $\varphi = Ml/(3EJ)$, определяем при единичном повороте $c = 3EJ/l$.

Для J можно положить при “точечной” массе $J = Mh^2$. Таким образом:

$$\omega = \sqrt{3EJ / Mlh^2}$$

Те же результаты можно получить из теории линейных колебаний, рассматривая перемещение точечной массы в горизонтальном направлении. В этом случае $\omega = \sqrt{g/y_{cm}}$, где: y_{cm} – перемещение массы в горизонтальном направлении от силы $Q = Mg$ (рис. 3, б). Очевидно, $y_{cm} = Q\delta_{cm}$. По эпюре моментов от единичной силы (рис. 3, в) определив результат перемножения этой эпюры самой на себя по правилу Верещагина, будем иметь:

$$\delta_{cc} = (hl/2) (2h/3)[1/(EJ)]$$

Окончательно $\omega = \sqrt{3EJ / Mlh^2}$.

2.2. Колебания под действием сил, изменяющихся во времени по

произвольному закону. Колебания массы M в случае если по балке перемещается груз P со скоростью v .

На невесомую консольную балку с сосредоточенной массой M опирается невесомая балка AB (рис. 4, а). Рассмотрим колебания массы M в случае если по балке AB перемещается равномерно со скоростью v груз P , который, дойдя до точки B останавливается. Силами инерции груза пренебрежем.

График изменения во времени нагрузки, приходящейся на массу M изображен на рис. 4, б выше оси абсцисс сплошной линией.

Когда груз перемещается по балке, давление, передаваемое на массу M выражается формулой:

$$P_1 = f(t_1) = t_1 \operatorname{tg} \alpha = t_1 (Pv/l_1)$$

В это время колебания массы M подчиняется закону:

$$y_1 \frac{1}{\omega M} \int_0^t f(t_1) \sin \omega(t-t_1) dt_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\omega M} \left(\frac{t}{\omega} - \frac{l}{\omega^2} \sin \omega t \right)$$

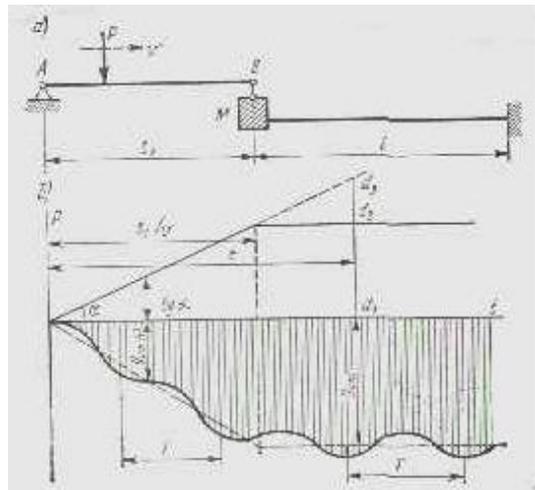


Рис.4. Невесомая консольная балка с сосредоточенной массой M

Так как $\omega^2 M = c$, $t \operatorname{tg} \alpha = Pt$ (значение опорного давления в мгновенное t), то имеем:

$$y_1 = y_{cm}(t) - [\operatorname{tg} \alpha / (c\omega)] \sin \omega t$$

т.е. конец консоли совершает гармонические колебания с постоянной амплитудой $tg\alpha/(c\omega)$ около равномерно возрастающего статического перемещения (рис. 4. б ниже оси абсцисс).

К моменту, когда груз придет в точку В, прогиб консоли станет равным:

$$y = \frac{Pl^3}{3EJ} - \frac{Pv}{l_1 c \omega} \sin \omega \frac{l_1}{v}$$

или, принимая во внимание, что в данном случае $c=3EJ/l^3$ и $\omega = \sqrt{3EJ / Ml^3}$, имеем

$$y = \frac{Pl^3}{3EJ} \left(1 - \frac{v}{l_1}\right) \sqrt{\frac{Ml^3}{2EJ}} \sin \omega \frac{l_1}{v} \quad (11)$$

Если $\omega l_1/v < \pi$ прогиб консоли в этот момент будет меньше статического прогиба; если $\omega l_1/v > \pi$, прогиб конца консоли будет больше статического. Общий вид колебаний массы изображен на рис. 4. б.

Скорость перемещения консоли:

$$v = \frac{dy_1}{dt} = \frac{tg\alpha}{c} (1 - \cos \omega t) , \quad (12)$$

а к моменту, когда груз придет в точку В,

$$v = \frac{tg\alpha}{c} (1 - \cos \omega \frac{l_1}{v}).$$

Когда груз остановится в точке В, перемещения конца консоли могут быть найдены следующим образом. Можно положить $f(t_1) = P = const$, но учесть, что к моменту появления постоянной силы P система уже имела начальный прогиб и начальную скорость, а можно и иначе – полагать, что ”прежний” закон “статического” нарастания нагрузки продолжается (рис. 4. б), но в мгновение $t=\alpha$ включаются новая сила обратного направления с той же интенсивностью нарастания, и, таким образом, результирующая сила будет

$$P = f(t_1) = d_1 d_3 - d_2 d_3 = \alpha tg \alpha.$$

При таком представлении силы колебания конца консоли будут происходить в соответствии с уравнением:

$$y_2 = \frac{tg\alpha}{\omega M} \left\{ \frac{t}{\omega} - \frac{l}{\omega^2} \sin \omega t - \left[\frac{t - \alpha}{\omega} - \frac{l}{\omega^2} \sin \omega(t - \alpha) \right] \right\}$$

Обозначая $atg\alpha/(\omega^2 M) = P/c = y_{cm} = Pl^3/(3EJ)$, после преобразования имеем:

$$y_2 = y_{cm} \frac{2Pv}{\alpha c \omega} \sin \frac{\omega \alpha}{2} \cos \omega \left(t - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (13)$$

т.е. когда груз будет неподвижно стоять на конце консоли, последняя будет совершать гармонические колебания около положения статического равновесия с постоянной амплитудой:

$$\lambda = \frac{2Pv}{\alpha \tilde{\omega}} \sin \omega \frac{\alpha}{2} . \quad (14)$$

Если $\omega \alpha = 2n\pi$, где: n – любое целое число, то колебаний не будет. Если $\omega \alpha = (2n + 1) \pi$, то амплитуда во второй стадии колебаний оказывается в два раза больше, чем в первой.

Предполагая закон изменения нагрузки во времени таким, как указано на рис. 4, б исследовать влияние скорости нарастания нагрузки до своего полного значения на величину наибольшего перемещения. Сравнить найденные наибольшие перемещения со статическими и построить график изменения коэффициента динамичности.

Зададим различные сроки нарастания нагрузки до своего полного значения, а именно $\alpha = 0; 0,5T; T; 1,5T; 2T$. Далее используя выражения (13) и (14) получим результаты, которые представлены на рис. 5.

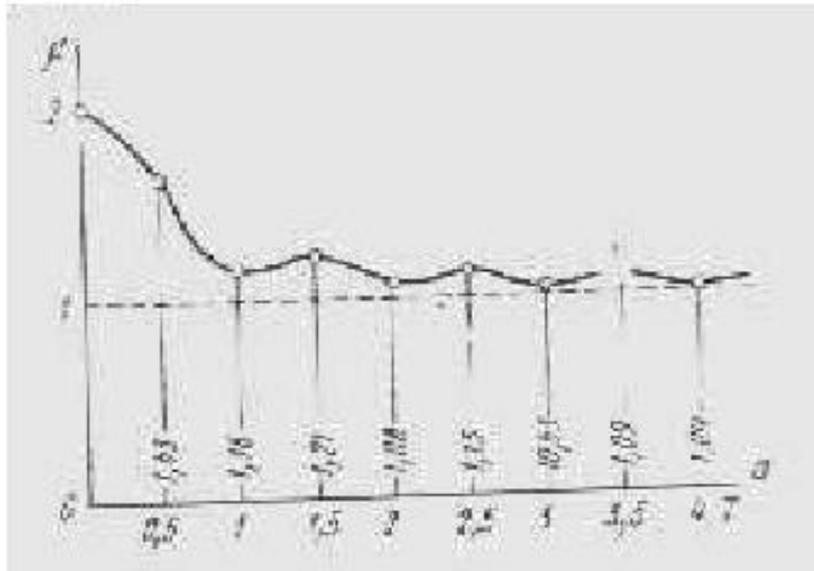


Рис.5. График изменения коэффициента динамичности

2.3. Колебания массы M при прохождении груза по балке и после ее схода

Описать колебания массы M при нахождении груза на балке и после схода его с балки, когда по невесомой консольной балке с сосредоточенной массой M на левом конце перемещается груз Q со скоростью v (рис. 6, а).

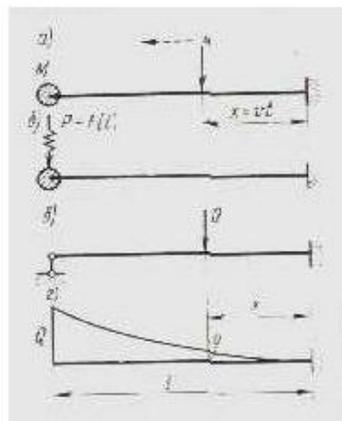


Рис.6.

Непрерывное перемещение груза по балке можно рассматривать как “скачущие” мгновенные силы, т.е. как приложение к балке через каждый промежуток времени dt в новой точке мгновенной силы с импульсом Qdt , причем новая точка приложения отстоит на бесконечно малом расстоянии от

предыдущей точки приложения в соответствии с рассматриваемым интервалом времени dt и скоростью передвижения груза по балке.

Ранее было найдено, что приложение мгновенной силы с импульсом Qdt в любом месте мгновенной силы с меньшим импульсом $Padt$, причем Pa представляет собой с обратным знаком реакции от силы Q на воображаемой опоре, если таковую представить на месте реальной массы M .

Так как непрерывное перемещение груза по балке мы уподобили “скачущим” импульсом, прилагаемым в различных точках балки, а влияние каждого из них эквивалентно мгновенной силе с меньшим импульсом и прикладываемой к самой массе, то движение груза по невесомой балке по отношению к колебаниям балки эквивалентно приложению к самой массе силы, непрерывно изменяющейся во времени (рис. 6, б), т.е. $P = f(t)$.

График изменения этой силы в связи с передвижением груза по балке должна представлять собой с обратным знаком линию влияния однородной реакции (рис. 6, г) в балке, изображенной на рис. 6, в.

Из статики сооружений известно, что $y = Qx^2(3l-x)/(2l^3)$. Так как $x=vt$ $P=P(tl)$ определяется так:

$$P = Qv^2t_1^2(3l - vt_1)/(2l^3)$$

Колебания массы M при нахождении груза на балке будут описываться уравнением:

$$y = \frac{1}{\omega M} \int_0^t f(t_1) \sin \omega(t - t_1) dt_1 = \frac{Qv^2}{2\omega^2 M l^3} \left[-vt^3 + 3lt^2 + \frac{6}{\omega^2} (vt - l + l \cos \omega t) - \frac{6v}{\omega^3} \sin \omega t \right] \quad (15)$$

Скорость перемещения массы в мгновение t определяется дифференцированием выражения (15) по времени:

$$\frac{dy}{dt} = y_{cm(max)} \frac{v^2}{2l^3} \left[-3vt^2 + 6lt + \frac{6}{v^2}(v - l\omega \sin \omega t) - \frac{6v}{\omega^2} \cos \omega t \right] \quad (16)$$

После схода груза с балки колебания системы будут происходить по закону свободных колебаний:

$$y = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$$

где y_0 и v_0 определяется из выражений (15) и (16) при $t=l/v$, а время t в последнем выражении отсчитывается от момента схода груза с балки.

Описать колебания массы \mathbf{M} при прохождении груза по балке и после схода с нее, если по невесомой двухопорной балке с сосредоточенной массой \mathbf{M} по середине пролета перемещается груз \mathbf{Q} с большой скоростью v (рис. 7, а).

Рассмотрим влияние перемещающегося груза на массу эквивалентно приложенной к массе силе, меняющейся во времени (рис.7, б) по закону линии влияния опорной реакции двухпролетной неразрезанной балки (рис. 7, в, г)/1/.



Рис.7. Влияние перемещающегося груза на массу эквивалентно приложенной к массе силе, меняющейся во времени

Принимая упомянутую линию влияния приближенно за синусоиду (погрешность составляет всего лишь ~2%), можно свести задачу к расчету системы с одной степенью свободы, подверженной действию силы, изменяющейся (2) во времени по закону одной полуволны синусоиды, и использовать решение задачи, в которой рассматривалось длительное действие синусоидальной нагрузки.

Согласно выражению

$$y = \frac{1}{\omega M} \int_0^t f(t_1) \sin \omega(t - t_1) dt_1 = y_{ct(\max)} \frac{1}{1 - (\theta / \omega)^2} \left(\sin \theta - \frac{\theta}{\omega} \sin \omega t \right), \quad (17)$$

при передвижении нагрузки по балке перемещение массы M следует закону

$$y = \frac{y_{ct(\max)}}{1 - (\theta / \omega)^2} \left(\sin \theta - \frac{\theta}{\omega} \sin \omega t \right), \quad (18)$$

где $y_{ct(\max)} = Q/(\omega^2 M)$, и который справедлив для $t < l/v$.

При $t > l/v$, т. е. после схода груза с балки, решение задачи можно представить следующим образом: на синусоиду с уравнением $Q \sin \theta t$ спустя время $a = l/v$ наложим синусоиду $Q \sin \theta (t - l/v)$, что в итоге даст $P = 0/2/$.

Таким образом, после схода груза с балки перемещения массы следуют закону

$$y = \frac{y_{ct(\max)}}{1 - (\theta / \omega)^2} \left[\sin \theta t - \frac{\theta}{\omega} \sin \omega t + \theta(t - a) - \frac{\theta}{\omega} \sin \theta(t - a) \right] \quad (19)$$

где $\theta = 2\pi/T_1 = \pi v/l$.

Выводы по второй главе

1. При продолжительном действии возмущающей силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону $P_1 = P \sin \theta t$, система будет совершать колебания с частотой θ возмущающей силы.

2. Коэффициент динамичности для перемещений одновременно является коэффициентом динамичности и для напряжений.

3. Если $\omega\alpha = 2n\pi$, где: n – любое целое число, то колебаний не будет. Если $\omega\alpha = (2n + 1)\pi$, то амплитуда во второй стадии колебаний оказывается в два раза больше, чем в первой.

ГЛАВА 3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СООРУЖЕНИЙ

Колебания с несколькими степенями свободы.

Краткие сведения из теории

Системами с n степенями свободы принято в динамике называть такие системы, для полной фиксации геометрического состояния которых в любой момент времени требуется задать n параметров, например положение (прогибы) n точек. Положение прочих точек определяется обычными статическими приемами.

Примером системы с n степенями свободы может служить балка или плоская рама, если массы ее отдельных частей или элементов условно (для облегчения динамического расчета) считаются сосредоточенными в n точках, или если она несет n больших масс (двигатели, моторы), по сравнению с которыми возможно пренебречь собственным весом элементов. Если отдельные сосредоточенные («точечные») массы могут при колебаниях совершать перемещения по двум направлениям, то число степеней свободы системы будет равно числу связей, которые следует наложить на систему, чтобы ликвидировать смещения всех масс.

Если вывести из равновесия систему с n степенями свободы, то она будет совершать **свободные колебания**, причем каждая «точка» (масса) будет совершать сложные полигармонические колебания типа:

$$y = \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cos \omega_i t + \sum_{i=1}^{i=n} B_i \sin \omega_i t \quad (20)$$

Постоянные A_i и B_i зависят от начальных условий движения (отклонений масс от статического уровня и скоростей в момент времени $t=0$). Лишь в

некоторых, особых, случаях возбуждения колебаний полигармоническое движение для отдельных масс может перейти в гармоническое, т.е. как в системе с одной степенью свободы:

$$y = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$$

Число собственных частот системы равно числу ее степеней свободы.

Для вычисления собственных частот необходимо решить так называемый определитель частот, записываемый в таком виде:

$$D = \begin{vmatrix} M_1 \delta_{11} \omega^{2-1} & M_2 \delta_{12} \omega^2 & \dots & M_i \delta_{1i} \omega^2 & \dots & M_n \delta_{1n} \omega^2 \\ M_1 \delta_{21} \omega^2 & M_2 \delta_{22} \omega^{2-1} & \dots & M_i \delta_{2i} \omega^2 & \dots & M_n \delta_{2n} \omega^2 \\ M_1 \delta_{i1} \omega^2 & M_2 \delta_{i2} \omega^2 & \dots & M_i \delta_{ii} \omega^{2-1} & \dots & M_n \delta_{in} \omega^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_1 \delta_{n1} \omega^2 & M_2 \delta_{n2} \omega^2 & \dots & M_i \delta_{ni} \omega^2 & \dots & M_n \delta_{nn} \omega^{2-1} \end{vmatrix} \quad (21)$$

Это условие в развернутом виде дает уравнение n -ой степени для определения n значений ω^2 , которое называется уравнением частот.

Через δ_{11} , δ_{12} , δ_{22} и т.д. обозначены возможные перемещения. Так, δ_{12} есть перемещение по первому направлению точки расположения первой массы от единичной силы, приложенной по второму направлению к точке расположения второй массы и т.д.

При двух степенях свободы уравнение частот получает вид:

$$(M_1 \delta_{11} \omega^2 - 1)(M_2 \delta_{22} \omega^2 - 1) - M_1 M_2 \omega^4 \delta_{12}^2 = 0$$

Откуда для двух частот имеем:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2} \sqrt{\delta_{11} \delta_{22} \pm (\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2)} \quad (22)$$

Для случая двух равных масс, симметрично расположенных на

симметричной упругой системе имеем $M_1=M_2$ и $\delta_{11}=\delta_{22}$ и выражение (22) принимает вид:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1 \pm \delta_{12}/\delta_{11}}{M_1 \delta_{11} [1 - (\delta_{12}/\delta_{11})^2]}$$

В том случае, когда отдельные массы M_i могут совершать в совокупности с линейными перемещениями также вращательные или только вращательные движения, то i -той координатой будет угол вращения, и в определителе частот массу

M_i надлежит заменить моментом инерции массы J_i ; соответственно возможные перемещения по направлению i -той координаты (δ_{i2}, δ_{i2} и т.д.) будут являться угловыми перемещениями.

Если какая-либо масса будет совершать колебания по нескольким направлениям - i -му и k -му (например, по вертикальному и горизонтальному), то такая масса участвует в определителе несколько раз под номерами M_i и M_k и ей соответствует несколько возможных перемещений ($\delta_{ii}, \delta_{kk}, \delta_{ik}$, и т.д.).

Заметим, что каждой собственной частоте присуща своя особая форма колебаний (характер изогнутой оси, линии прогибов, перемещений и т.п.), которая отдельных, особых, случаях может оказаться действительной формой колебаний, если только надлежащим образом или возбуждены свободные колебания (надлежащий подбор импульсов, точек их приложения и т.п.). В этом случае колебания системы будут совершаться по законам движения системы с одной степенью свободы.

В общем случае, как это вытекает из выражения (20), система совершает полигармонические колебания, но, очевидно, что всякая сложная упругая линия, в которой отражается влияние всех собственных частот, может быть разложена на отдельные составляющие формы, каждая из которых соответствует своей собственной частоте. Процесс такого разложения истинной формы колебаний на составляющие (что необходимо при решении

сложных задач строительной динами) носит название разложения по формам собственных колебаний.

Если в каждой массе, точнее – по направлению каждой степени свободы, приложить возмущающую силу, изменяющуюся по времени по гармоническому закону $P_i \sin \theta t$ или $P_i \cos \theta t$, что для дальнейшего безразлично, причем амплитуды сил при каждой масс различны, а частота и фаз одинаковы, то при продолжительном действии таких возмущающих сил система будет совершать установившееся вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы.

Амплитуды перемещений по направлению любой i -той степени в этом случае будет:

$$A_i = - D_i / D \quad (23)$$

где определитель D записывается по (21) с заменой ω на θ и, следовательно, $D \neq 0$; D_i определяется выражением:

$$D = \begin{vmatrix} M_1 \delta_{11} \theta^{2-1} & M_2 \delta_{12} \theta^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{i=n} p_i \delta_{1i} & \cdots & M_n \delta_{1n} \theta^2 \\ M_1 \delta_{21} \theta^2 & M_2 \delta_{22} \theta^{2-1} & \cdots & \sum_{i=1}^{i=n} p_i \delta_{2i} & \cdots & M_n \delta_{2n} \theta^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_1 \delta_{i1} \theta^2 & M_2 \delta_{i2} \theta^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{i=n} p_i \delta_{ii} & \cdots & M_n \delta_{in} \theta^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_1 \delta_{n1} \theta^2 & M_2 \delta_{n2} \theta^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{i=n} p_i \delta_{ni} & \cdots & M_n \delta_{nn} \theta^{2-1} \end{vmatrix} \quad (24)$$

т.е. i -й столбец определителя D заменяется столбцом, составленным из членом вида: $\sum_{i=1}^{i=n} A_i P_i \delta_{ki}$

Для случая двух степеней свободы:

$$\begin{aligned} D_1 &= (M_2 \delta_{22} \theta^2 - 1)(P_1 \delta_{11} + P_2 \delta_{12}) - M_2 \delta_{21} \theta^2 (P_1 \delta_{21} + P_2 \delta_{22}); \\ D_2 &= (M_1 \delta_{11} \theta^2 - 1)(P_1 \delta_{21} + P_2 \delta_{22}) - M_1 \delta_{12} \theta^2 (P_1 \delta_{11} + P_2 \delta_{12}); \\ D &= (M_1 \delta_{11} \theta^2 - 1)(M_2 \delta_{22} \theta^2 - 1) - M_1 M_2 \delta_{12}^2 \theta^4 \end{aligned} \quad (25)$$

И соответственно $A_I = -DI/D$; $A_I = -D_I/D$;

При расчете на вынужденные колебания балок постоянного сечения, несущих сосредоточенные массы (рис.9.1).

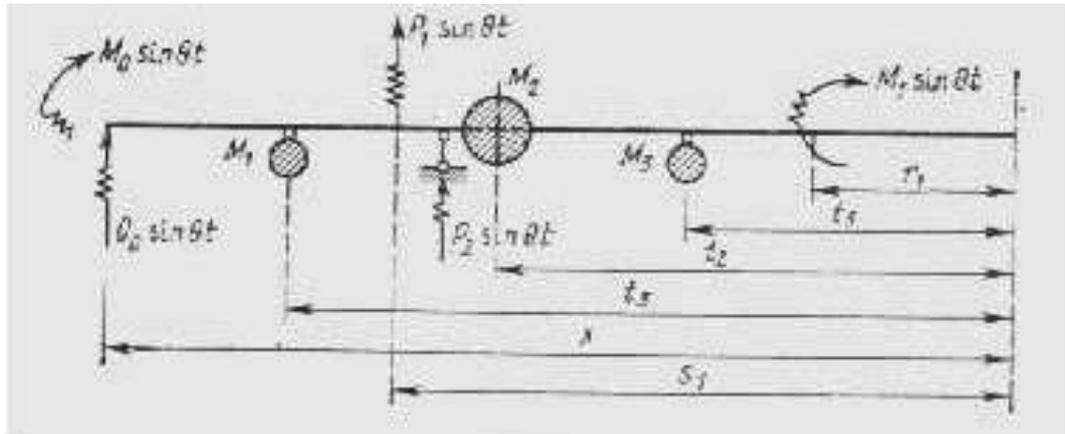


Рис. 8. К расчету на вынужденные колебания балок постоянного сечения

Проще, однако, пользоваться нижеуказанными формулами для амплитуд прогиба, угла поворота, изгибающего момента и поперечной силы в любом сечении балки:

$$\left. \begin{aligned}
 y_x &= y_0 + \varphi_0 x + \frac{1}{EJ} \left[M_0 \frac{x^2}{2} + \sum M_i \frac{r_i^1}{2} + Q_0 \frac{x^3}{3} + \sum P_i \frac{s_i^2}{3} + \theta^2 \left(\sum M_i y_i \frac{t_i^3}{3} + \sum J_i \varphi_i \frac{t_i^3}{2} \right) \right]; \\
 \varphi_x &= \varphi_0 + \frac{1}{EJ} \left[M_0 x + \sum M_i r_i + Q_0 \frac{x^2}{2} + \sum P_i \frac{s_i^2}{2} + \theta^2 \left(\sum M_i y_i \frac{t_i^2}{2} + \sum J_i \varphi_i t_i \right) \right]; \\
 M_x &= M_0 + \sum M_i + Q_0 x + \sum P_i s_i + \theta^2 \left(\sum M_i y_i t_i + \sum J_i \varphi_i t_i \right); \\
 Q_x &= Q_0 + \sum P_i + \theta^2 \sum M_i y_i;
 \end{aligned} \right\} (26)$$

где y_0, φ_0, M_0, Q_0 – амплитуды прогиба, поворота, момента и поперечной силы начального сечения (начальные параметры); M_i и J_i – масса и ее момент инерции (сосредоточенные массы); знак Σ распространяется на все силы и сосредоточенные массы, расположенные от начального сечения до обследуемого.

Указанными формулами (26) можно пользоваться и при вычислении собственных частот, для чего необходимо считать возмущающие силы ΣP_i и моменты ΣM_i равными нулю, заменить частоту вынужденных колебаний θ частотой собственных колебаний ω и, предполагая существование колебаний (свободных колебаний), написать выражения (26) применительно к сечениям, где расположены сосредоточенные массы и уже известны амплитуды (опорные сечения, ось симметрии и т.д.). Получим систему однородных линейных уравнений. Приравнявая к нулю определитель этой системы, получим возможность вычислить собственные частоты.

Целесообразным, оказывается использовать выражения (23) и (24) для определения амплитуд (y_0 , φ_0 , и т.п.) при $x=0$, а затем с помощью (26) вычислить все остальные элементы прогиба.

С помощью формул (26) можно составить таблицу амплитуд реакций для различных случаев балок (таблица 9.1). Данные, приведенные в таблице, могут быть с успехом применены к расчету рам на вынужденные колебания или к определению собственных частот, если параллельно использовать метод перемещений, хорошо известных читателю из курса строительной механики обобщенный на динамические задачи.

В расчетных формулах (9.1-жадвал) через l обозначен пролет балки, а для случаев 6-8 для определения μ следует использовать формулу (8.10). значение коэффициентов α и α_l зависит от отношения a/b .

Более сложной является задача расчета движений системы с несколькими степенями свободы на действие произвольной нагрузки, изменяющейся во времени и приложенной к различным массам.

При решении такой задачи надлежит поступать следующим образом:

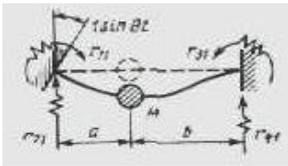
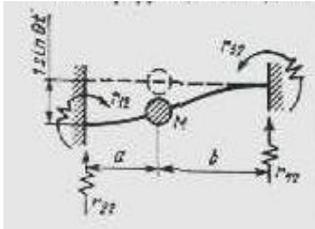
- а) определить собственные частоты и формы собственных колебаний;
- б) заданную нагрузку перегруппировать между массами или, как принято говорить, разложить по формам собственных колебаний. Число групп нагрузок равняется числу собственных частот системы;

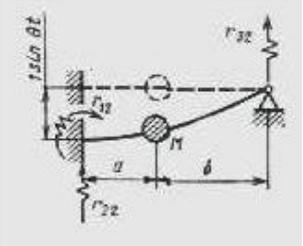
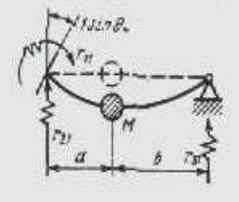
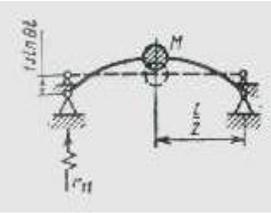
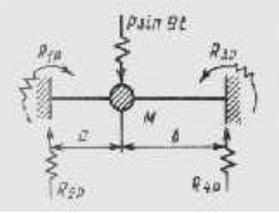
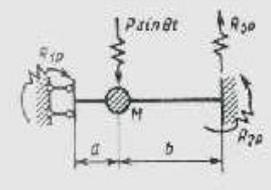
в) после выполнения указанных выше двух вспомогательных операций сделать расчет для каждой группы нагрузок по известным формулам из теории колебаний системы с одной степенью свободы, причем частота собственных колебаний в этих формулах принимается та, которой соответствует данная группа нагрузки;

г) частные решения от каждой категории нагрузок суммируют, чем и определяется окончательное решение задачи.

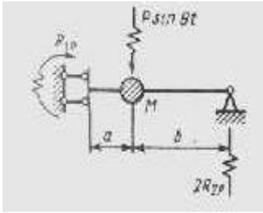
Таблица 9.1.

Таблица амплитуд реакций при вынужденных колебаниях

Схема сооружений и расчетное воздействие	Расчетные формулы для амплитудных реакций
<p>1. Вибрирующий поворот</p> 	$r_{11} = \frac{4Ej}{l} \cdot \frac{1 - (\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ $r_{21} = \frac{6Ej}{l^2} \cdot \frac{1 - \alpha_1(\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ <p>При $\alpha=b$, $\alpha=4/7$, $\alpha_1=12/7$</p> $\omega^2 = \frac{12EJ}{Mb^3 [l(3\alpha^2 + 3\alpha l - 2l^2) + b^2(3l - b)]}$
<p>2. Вибрирующее смещение</p> 	$r_{22} = \frac{2Ej}{l^3} \cdot \frac{1 - (\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ $r_{12} = \frac{6Ej}{l^2} \cdot \frac{1 - \alpha_1(\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ <p>При $\alpha=b$, $\alpha=1/5$, $\alpha_1=3/5$</p> $\omega^2 = \frac{12EJ}{Mb^3 \left(4 - 3\frac{b}{l}\right)}$

<p>3. Вибрирующее смещение</p> 	$r_{22} = \frac{3Ej}{l^2} \cdot \frac{1 - (\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ $r_{12} = \frac{3Ej}{l^2} \cdot \frac{1 - \alpha_2(\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ <p>При $\alpha=b$, $\alpha=7/128$, $\alpha=5/32$</p> $\omega^2 = \frac{3EJ}{M\alpha^2b \left(3 + \frac{b^2}{\alpha^2}\right)}$
<p>4. Вибрирующий поворот</p> 	$r_{11} = \frac{3Ej}{l} \cdot \frac{1 - (\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ $r_{21} = \frac{3Ej}{l^2} \cdot \frac{1 - \alpha_1(\theta/\omega)^2}{1 - \alpha(\theta/\omega)^2};$ <p>При $\alpha=b$, $\alpha=7/16$, $\alpha=5/12$</p> $\omega^2 = \frac{3EJ}{M\alpha^2b^2}$
<p>5. Вибрирующее поступательное движение всей балки</p> 	$r_{11} = \frac{\theta^2}{2[1 - (\theta/\omega)^2]};$ $\omega^2 = \frac{48EJ}{Ml^3}$
<p>6. Вибрирующая сила</p> 	$R_{1p} = -\frac{R\alpha b^2}{l^2}; R_{2p} = -\frac{R\alpha b^2}{l^2} + \left[1 + \frac{\alpha}{l^2}(b - \alpha)\right]\mu;$ $R_{3p} = -\frac{Pb\alpha^2}{l^2}\mu; R_{4p} = -\frac{P\alpha}{l} \left[1 + \frac{b}{l^2}(\alpha - b)\right]\mu;$ $\omega^2 = \frac{3l^3EJ}{M\alpha^3b^3}$
<p>7. Вибрирующая сила</p> 	$R_{1p} = -\frac{R\alpha b^2}{2l}\mu; R_{2p} = -\frac{Pb^2}{2l} \left(1 - \frac{2l}{b}\right)\mu;$ $R_{3p} = P\mu;$ $\omega^2 = \frac{12EJ}{Mb^3 \left(4 - 3\frac{b}{l}\right)}; \mu = \frac{1}{1 - (\theta/\omega)^2};$

8. Вибрирующая сила



$$R_{1p} = Pb\mu; R_{2p} = P\mu;$$

$$\omega^2 = \frac{3EJ}{M\alpha b^2 \left(3 + \frac{b}{\alpha}\right)}; \mu = \frac{1}{1 - (\theta/\omega)^2};$$

Определение собственных частот выполняется согласно (21). Что касается выявления форм собственных колебаний, то здесь необходимо руководствоваться тем основным свойством любой формы собственных колебаний, что она представляет собой линию влияния прогиба от сил (число которых равно числу степеней свободы), пропорциональных произведению масс на ординаты прогибов точек прикрепления масс. При равных массах форма собственных колебаний представляет линию прогиба от сил, пропорциональных ординатам прогиба; эпюра нагрузки подобна эпюре прогиба.

Низшей частоте соответствует наиболее простая форма колебаний. Для балок чаще всего эта форма близко отвечает изогнутой оси системы под влиянием собственного веса. Если данная конструкция оказывается менее жесткой в каком-либо направлении, например в горизонтальном, то для выявления характера искомой изогнутой оси надлежит условно собственный вес приложить в этом направлении.

Что касается второй формы собственных колебаний, то необходимо удовлетворить условие ортогональности, а именно:

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_i y_{1i} y_{2i} = 0 \quad (27)$$

где y_{1i} — ординаты точек, в которых расположены массы M_i , соответствующие первой форме, а y_{2i} — соответствующие второй.

Для определения следующих высших форм ординаты должны аналогично удовлетворять условию ортогональности по отношению ко всем предыдущим формам собственных колебаний.

Разложение заданной внешней нагрузки по формам собственных колебаний следует понимать так, что заданная нагрузка представляется состоящей из нескольких групп, подобранных с таким расчетом, что от действия каждой группы статическая изогнутая ось системы будет по своей форме соответствовать ранее найденной одной из форм собственных колебаний.

Эффективным методом определения частот свободных колебаний является графоаналитический метод, разработанный А.Ф. Смирновым. Этот метод, использующий теорию матриц, является одним из наиболее мощных инструментов для решения задач динамики с использованием ЭВМ.

Уравнение частот записывается в следующем виде:

$$|C - \lambda E| = 0 \quad (28)$$

причем после нахождения характеристических чисел λ частоты собственных колебаний определяется выражением $\omega = \sqrt{1/\lambda}$

В определителе (28) E – единичная диагональная матрица, матрица C определяется матричным произведением:

$$C = L_m^* B L_m M^* \quad (29)$$

где L_m – матрица влияния моментов в заданной системе, т.е. матрица, каждый столбец которой определяет значения моментов во всех точках приложения масс от действия единичной силы в соответствующей точке балке; L_m^* – матрица влияния моментов в фиктивной балке. В случае балки с шарнирно опертыми краями фиктивная балка совпадает с заданной; B – матрица упругих грузов, определяемая выражением (3.8); M^* – диагональная

матрица, определяемая значениями масс, приложенных в разных точках, причем:

$$M^* = m_0 \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & \\ & \alpha_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \alpha_n \end{bmatrix}; \alpha_i = \frac{m_i}{m_0}$$

где m_0 – некоторая произвольная масса.

Отыскание характеристических чисел определителя может быть произведено методом итераций или любым иным эффективным методом.

Необходимо, однако, подчеркнуть, что определение частот колебаний можно провести, не прибегая даже к понятию определителя. В данном случае достаточно рассмотреть матрицу С- λ Е и вычислить ее собственные числа и соответствующие им собственные векторы любым прямым методом: методом Якоби, методом понижения или методом исчерпания в сочетании с методом итераций.

Приближенные динамические расчеты сооружений

Краткие сведения из теории

Наиболее простой приближенный расчет сооружений на действие динамической нагрузки заключается в том, что заданное сооружение заменяется условно системой с одной степенью свободы. В соответствии с указанным все динамические внешние силы, прикладываемые к различным точкам сооружения, должны быть заменены одной сосредоточенной динамической силой, действующей в выбранном центре проведения масс. Строгое решение задач о том, каким образом должно выполняться указанное условное перенесение сил, представляется очень сложной и поэтому имеется несколько различных практических предложений.

Так, приведенная сила определяется из условия, чтобы вызываемое ею перемещение «центра приведения», в предположения ее статического действия, равнялось перемещению той же точки от действительных сил, если их действие также предположить статическим.

Встречаются попытки определять приведенную силу из условия, чтобы при каком-либо возможном перемещении действительной системы работа приведенной силы равнялась работе действительных сил. За возможные перемещения в таком случае выбирают ту статическую упругую линию, которая близка к предположительной форме колебаний системы от настоящих динамических сил. Проще первый вариант.

Если динамическими нагрузками являются силы постоянной величины, но быстро перемещающиеся по сооружению, то в таком случае они также могут быть заменены одной неподвижной по положению силой в центре передвижения, но зато переменной по величине, т.е. изменяющиеся во времени.

Закон изменения во времени упомянутой приведенной силы может быть назначен из условия, чтобы статическое перемещение центра приведения в любое мгновение от действительной силы равнялось перемещению того же центра от одной приведенной силы, если соответственно подобрать величину последней.

Уточнением приближенных динамических расчетов будет сведение заданного реального сооружения к системе с несколькими степенями свободы и преобразование действительных динамических сил, распределенных по длине всего сооружения, в силы действующие по направлению выбранных степеней свободы в соответствии с формами собственных колебаний системы с несколькими массами.

Действие на упругую систему **влезанной** нагрузки, которая перед своим воздействием на сооружение имела уже некоторую скорость, принято называть *ударом*. С теоретической стороны указанная ударная нагрузка не должна отличаться от динамических нагрузок, **но закон заменена во времени**

давления на упругую систему во время удара упавшего на нее снаряда (копер, кузнечный молот и т.п.) до настоящего времени недостаточно выяснений, что заставляет при изучении явлений удара реже пользоваться классической теорией упругих колебаний и чаще применять так называемый энергетический способ.

Последовательность решения задач отмеченным выше такова:

- а) вычисляется кинетическая энергия ударяющего тела;
- б) составляется выражение потенциальной энергии V_δ стержней, воспринимающих удар; потенциальную энергию удобно выразить через напряжение в опасном сечении (если конечной целью расчета является определение напряжений) **при** через наибольшую деформацию, т.е. через удлинение, прогиб и т.п.;
- в) **полагая переход кинетической энергии в потенциальную энергию деформация и поэтому приравнивая $A=V_\delta$, находим непосредственно динамическое напряжение или деформацию (или проведенную силу, которая при своем статическом действии вызывает напряжения и деформации, равные искомым динамическим).**

Приближенность указанного метода заключается в том, что отсутствует форма перехода кинетической энергии в другие формы энергии, кроме потенциальной энергии и упругих деформаций, в допущении, что напряжения во всех поперечных сечениях достигают своих наибольших значений одновременно. Массой упругой системы обычно пренебрегают по сравнению с массой ударяющего тела.

В случае, если удар осуществляется по несвободной системе (балка на опорах и т.п.), то для вычисления напряжений и деформаций может служить любая из указанных формул:

$$\sigma_\delta = \bar{\sigma} \sqrt{2A / \delta_{aa}} = \bar{\sigma} \sqrt{2Ac} = \bar{\sigma} \sqrt{2A / U_1} ;$$

$$y_\delta = \bar{\sigma} \sqrt{2A / \delta_{aa}} = \bar{\sigma} \sqrt{2A / c} = \bar{\sigma} \sqrt{2AU_1} ;$$

$$P_{np} = \bar{\sigma} \sqrt{2A / \delta_{aa}} = \sqrt{2Ac} = \frac{2}{\delta_{aa}} \sqrt{AU_1} = \frac{S}{\omega M_{np} \delta_{aa}}$$

где c – жесткость системы; U_1 – потенциальная энергия для случая единичной кинетической силы, прикладываемой к конструкции в место удара; P_{np} – эквивалентная статическая сила, которая при приложении в место удара создает такие же напряжения и деформации, как и заданная динамическая нагрузка; S – импульс ударной силы; $\bar{\sigma}$ и δ_{aa} – статические напряжение и деформация от единичной силы, прикладываемой к конструкции в место удара.

В случае, если кинетическая энергия системы сама зависит от перемещений системы (например, в случае свободного падения груза P от высоты h кинетическая энергия $A=P(h+y)$, то необходимо пользоваться формулой для коэффициента динамичности в одной из указанных записей (с учетом массы упругой системы):

$$\mu = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{y_{cm(P)}(1+Q/P)}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{qy_{cm(P)}(1+Q/P)}} \quad (30)$$

Где h – высота свободного падения груза (измеряется до уровня недеформированной балки); v – скорость груза непосредственно перед ударом; Q – сосредоточенная масса, приведенная, системы в место удара.

Динамические напряжения и деформации определяются из выражений:

$$\sigma_{\partial} = \mu \sigma_{cm} = \mu P \bar{\sigma}; \quad y_{\partial} = \mu y_{cm(P)} \quad (31)$$

где $y_{cm(P)}$ – напряжение и деформация, вызванные грузом в предположении от статического действия.

В случае, если при ударе (например, при взрыве) оказывается известным импульс удара, то расчет сооружения может быть наполнен в соответствии с

расчетом на действие мгновенных сил. Для такой цели заданный ударный импульс, известным образом распределенный по длине сооружения заменяется импульс, действующим в центре приведения массы. Способы приведения указанного импульса к одной точке аналогичны общему способу условного перемещения динамических сил в центр приведения. Следует заметить, что расчеты по известному импульсу правильнее отображают действительное поведение конструкции при динамической нагрузке, нежели расчеты по заданной кинетической энергии удара.

Однако следует учесть, что расчеты могут привести к неправдоподобным результатам, если время действия динамических сил будет значительно превышать десятую долю периода собственных колебаний сооружения (основного тона).

Расчетная сейсмическая нагрузка S_{ik} в выбранном направлении, приложенная к точке k и соответствующая i -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, определяется по формуле:

$$S_{ik} = K_1 K_2 Q_k A \beta_i K_\varphi \eta_{ik} \quad (32)$$

где: Q_k – вес здания или сооружения, отнесенной к точке, k ; β_i – коэффициент динамичности, определяемый в зависимости от периода колебаний T_i (i – номер формы), причем:

$$\beta_i = a / T_i \quad (33)$$

для прочных скальных грунтов (см. СНиП 11-7-81 “Строительство в сейсмических районах”) $a=1, 0,8 \leq \beta_i \leq 3$; для нарушенных скальных грунтов, а также песков, глин, суглинков и супесей с малыми показателями консистенции $a=1,1, 0,8 \leq \beta_i \leq 2,7$; для грунтов с большими показателями консистенции (порядка 05...09 в зависимости от грунта) $a=1,5, \beta_i \leq 2$;

A – коэффициент, значение которого следует принимать равным 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов;

K_1 – коэффициент, учитывающий допустимые повреждения зданий и сооружений: если для сооружений не допускаются остаточные деформации и локальные повреждения, то $K_1=1$; если допускаются частичные повреждения при обеспечении безопасности людей и сохранности оборудования, то $K_1=0,25$; для прочих сооружений при условии обеспечения безопасности людей $K_1=0,25$ б/улади.

K_φ – коэффициент, учитывающий характеристики конструкций: для высотных сооружений и каркасных зданий, стеновое заполнение которых не оказывает влияние на его деформативность, при отношении высоты стойки h к поперечному размеру в направлении действия расчетной сейсмической нагрузки, равной или более 25 $K_\varphi=1,5$; для прочих зданий $K_\varphi=1$;

K_2 – коэффициент, учитывающий конструктивное решение зданий. Этот коэффициент может принимать значения от 0,5 до 1,5; коэффициент формы колебаний η_{ik} учитывает тот факт, что на разных высотах ординаты формы имеют различные значения:

$$\eta_{ik} = X_i(x_k) \sum_{j=1}^n Q_j X_j(x_j) / \sum_{j=1}^n Q_j X_j^2(x_j) \quad (34)$$

Для заданий высотой до пяти этажей при $Ti < 0,4$ можно воспользоваться приближенной формулой:

$$\eta_{ik} = x_k \sum_{j=1}^n Q_j x_j / \sum_{j=1}^n Q_j X_j^2$$

где: x_i, x_j – соответственно расстояния от основания до местрасположения точек i и j по высоте сооружения.

Для массивных сооружений, деформация которых малы по сравнению с перемещениями вследствие податливости основания, период свободных колебаний можно вычислять по формуле:

$$T = 2\pi v^* \sqrt{M / k_x} \quad (35)$$

где M – масса сооружений; v^* – коэффициент, учитывающая инерцию вращения сооружения

$$v^* = 1,2 + 0,41h/b \quad (36)$$

h – высота расположения центра тяжести сооружения над уровнем основания; b – ширина основания;

k_x – жесткость основания при сдвиге, определяемая сопротивлением грунта под подошвой фундамента $C_x F_\phi$ и по боковым поверхностям, по которым возникает трение $F_{тр}$ и сжатие $F_{сж}$ грунта:

$$k_x = C_x F_\phi + C_x F_{тр} + C_z F_{сж} \quad (37)$$

Коэффициенты, характеризующие упругие свойства грунта, зависящие от расчетного сопротивления грунта: $C_x = 0,7 C_z$ – коэффициент упругого равномерного сдвига; C_z – коэффициент упругого равномерного сжатия.

Если в расчетной схеме массивного сооружения вес принят распределенным по высоте и точках расположения сосредоточенных масс, определяют соответствующие сейсмические силы, то последние следует вычислять с учетом формы колебаний:

$$X_k = 1 + \frac{h_k}{8,6b + 4,7h} \quad (38)$$

Для высоких гибких сооружений свободные колебания могут быть учтены приближенно следующим образом:

Расчетная схема сооружения рассматривается как система с 5-8 сосредоточенными массами, вес каждой из которых равен Q_i ;

1) ординаты X_i форм свободных колебаний в зависимости от тона вычисляются как для консольного стержня постоянного сечения;

2) в одной из точек системы k от сил $P_i = Q_i X_i$ вычисляется статический прогиб;

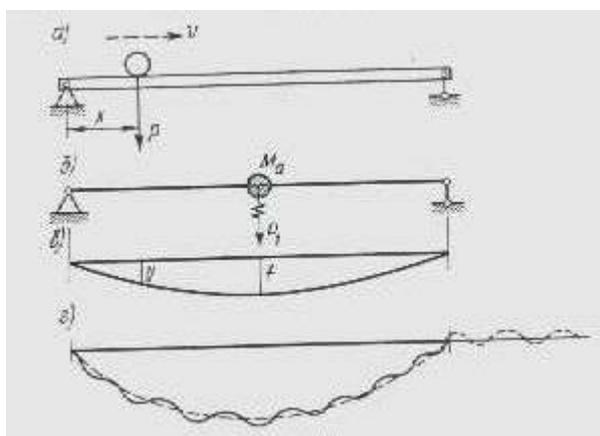


Рис. 9.

3) в зависимости от тона колебаний определяется соответствующий период свободных колебаний: $T = 2\pi \sqrt{f_x / (gX_k)}$.

3.1. Влияние перемещающихся нагрузок

Описать колебания середины моста, если по тяжелому балочному мосту (рис.9, а), с равномерным распределением масс и одинаковой жесткостью по длине быстро перемещается легкий груз со скоростью v .

В начале заменим заданную конструкцию системой с одной степенью свободы, для чего балку будем полагать невесомой и несущей в среднем сечении сосредоточенную массу, равную $17/35$ от действительной массы сооружения (рис. 9, б). Массой перемещающегося груза в соответствии с условием можно пренебречь.

Далее, груз, меняющий свое положение, условно заменим приведенным грузом, находящимся в средние пролета и меняющим свою величину во времени. Указанный приведенный груз найдем из условия, чтобы статический прогиб середины моста под действием этого груза равнялся прогибу от действительного груза.

Принимая приближенно линию влияния прогиба середины моста по синусоиде (рис.9, в), имеем:

$$P_y = P f$$

откуда приведенный груз:

$$P_1 = P_y / f = P \sin(\pi x / l)$$

Принимая во внимание, что $x = vt$ и вводя обозначение $\pi v / l = \beta$, имеем:

$$P_1 = P \sin \beta t \quad (39)$$

Таким образом, изучение колебаний середины моста вследствие быстрого перемещения постоянного груза может быть заменено изучением колебаний системы с одной степенью свободы под влиянием нагрузки, изменяющей свое значение во времени по гармоническому закону (12.9):

Подобная задача решалась ранее (см. задачу 8.31), где было установлено:

$$y = y_{cm(max)} \frac{1}{1 - (\beta / \omega^2)} \left(\sin \beta t - \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right) \quad (40)$$

Графический закон колебаний представлен на рис. 12.1, г.

Наибольший эффект движущегося груза может быть приближенно на основании (12.10) выражением:

$$y_{max} \approx y_{cm(max)} \frac{1}{1 - \beta / \omega}$$

где $\beta/\omega = Tv/(2l) = \pi v/(l\omega)$; $y_{cm(max)} = Pl^3/(48EJ)$ – наибольшее статическое перемещение от груза при нахождении его по середине пролета; ω – частота свободных колебаний.

Описать колебания середины моста, если по тяжелому балочному мосту со скоростью v движется легкий груз, вес которого изменяется во времени по гармоническому закону (рис. 10, а).

На основании рассуждений (см. предыдущую задачу) приведенный груз P_1 определяется выражением:

$$P_1 = P \sin \theta t \sin(\pi x/l) = P \sin \theta t \sin \beta t$$

где: $\beta = \pi v/l$

сводя задачу к простейшей модели – система с одной степенью свободы (рис. 10, б), подвергающейся действию переменной силы P_1 для перемещения середины моста имеем выражение:

$$y \frac{1}{\omega M_a} \int_0^t \sin \theta_1 i \sin \beta t_1 \sin \omega(t - t_1) dt = \frac{P}{\omega M_a} \int_0^t \sin \theta_1 i \sin \beta t_1 \sin \omega(t - t_1) dt_1$$

После интегрирования получаем:

$$y = \frac{1}{\omega M_a} \left[\frac{\cos \theta_1 i \cos \omega t}{\omega^2 - \theta_1^2} - \frac{\cos \theta_2 i \cos \omega t}{\omega^2 - \theta_2^2} \right]$$

где: $\theta_2 = \theta - \beta$; $\theta_2 = \theta + \beta$

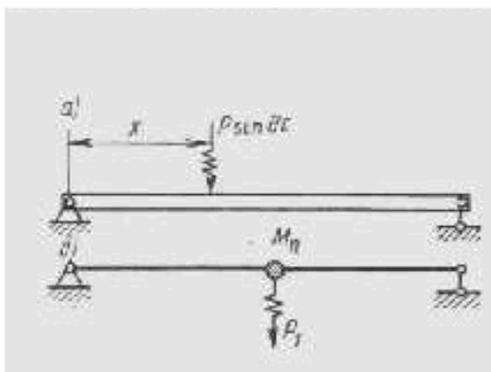


Рис. 10

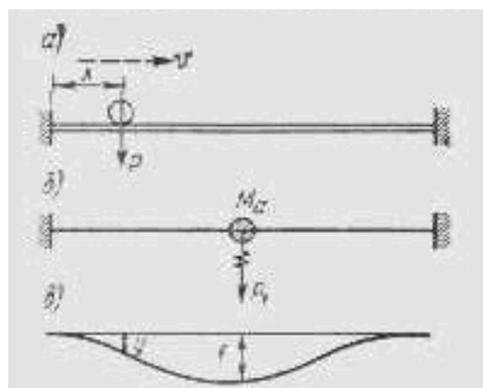


Рис. 11.

Задача 1. Для моста пролетом $l = 55$ м, собственный вес которого $d=41,8$ кН/м, известна частота свободных колебаний $\omega=27,4$ с⁻¹. Определить, как изменяется частота собственных колебаний, когда по мосту будет передвигаться товарный поезд, вес которого $q_1 = 30$ кН/м.

Решение: Так как частота обратно пропорциональна корню квадратному на нагрузки, то частота свободных колебаний загруженного моста $\omega_1 = \omega\sqrt{q/(q+q_1)} = 20,9$ с⁻¹.

Задача 2. Для предыдущей задачи требуется определить критическую скорость товарных поездов, при которой может наступить так называемый вагонный резонанс, т.е. когда частота ударов колес в стыках будет совпадать с частотой собственных колебаний загруженного моста. Предположить, что все оси вагонов вшаимно раздвинуты на одну и ту же длину $d=3,8$ м.

Р е ш е н и е: При скорости v (м/с) частота ударов $\theta=2\pi v/d=2\pi v/3,8$. Приравнивая эту частоту собственной частоте моста, получаем $v=\omega_1 d/(2\pi)$. В нашем случае $v=20,9 \cdot 3,8/6,28=12,6$ м/с.

Задача 3. По балке с обоими заделанными концами движется со скоростью v груз P (рис. 11, а). Требуется описать колебания середины моста.

Данную задачу сводим к расчету системы с одной массой, подверженной действию переменной силы (рис. 11, б). Принимая, линию влияния прогиба середины моста за синусоиду (рис. 11, в), получим для приведенного груза выражение:

$$P_1 = \frac{P}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right)$$

Обозначая $x = vt$; $2\pi v/l$, имеем

На основании задачи 8.42 для случая пребывания груза на балке имеем:

$$y = \frac{y_{cm(max)}}{2} \left[1 - \cos \frac{\omega x}{v} - \frac{1}{1 - (\beta^2 / \omega^2)} \left(\cos \frac{2\pi x}{l} - \cos \frac{\omega x}{v} \right) \right]$$

Задача 4. По легкому балочному мосту со скоростью v перемещается тяжелый груз (рис. 12), по сравнению с которым массой моста возможно пренебречь. Определить динамический коэффициент.

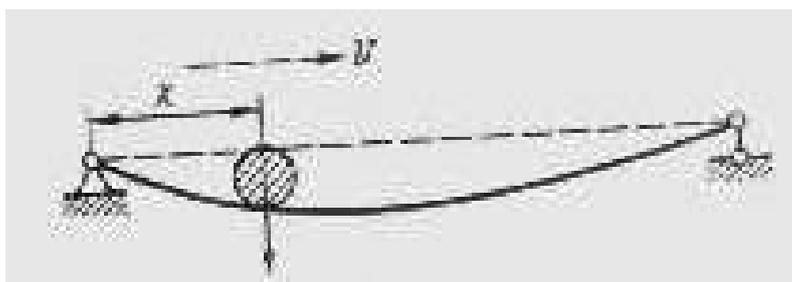


Рис. 12

Решение: Пологая для упрощения, что мост лишен массы и обладает лишь жесткостью, следует считать, что в любой момент времени перемещение под грузом соответствует статическому прогибу от

динамического давления R , которое, согласно принципу Д'Аламбера, равняется:

$$R = P - M \frac{d^2 y}{dt^2} = P \left(1 - \frac{1}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} \right) \quad (41)$$

Из сопротивления материалов известна связь между давлением и прогибом:

$$y = \frac{R}{EJ} \frac{x^2(1-x)^2}{3l} \quad (42)$$

Если выражение (42) подставить в (41), то получится довольно сложное дифференциальное уравнение. По этой причине выражение (42) подставим приближенно, заменив R на P , т.е.

$$y = \frac{P}{EJ} \frac{x^2(1-x)^2}{3l} \quad (43)$$

Принимая во внимание, что $x = vt$ имеем:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = v^2 \frac{d^2 y}{dx^2};$$

$$R = P \left(1 - \frac{v^2}{g} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \right)$$

Используя выражение (43), окончательно получим:

$$R = P \left[1 - \frac{v^2}{g} \cdot \frac{2P}{3EJ} (l^2 - 6lx + 6x^2) \right]$$

откуда:

$$R_{\max} = P \left(1 + \frac{v^2}{g} \cdot \frac{Pl}{3EJ} \right)$$

Подставляя $R_{\max} = \mu P$, имеем $\mu = 1 + \frac{v^2}{g} \cdot \frac{Pl}{3EJ}$

Расчет середины балки железнодорожного железобетонного моста во время прохождения состава по мосту при различной скорости движения

Используя компьютерную программу «MATCAD» нами произведен расчет середины балки железнодорожного железобетонного моста во время прохождения пассажирского высокоскоростного состава по мосту при различной скорости движения. Расчет произведен для следующих параметров моста:

- длина железобетонной балки 16,5 м;
- момент инерции балки $j=465 \text{ м}^4$;
- модуль упругости бетона $E_6 = 5,1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$;
- скорость движения состава 120, 150, 200 км/час;
- частоты вынужденных колебаний $\omega=27.4 \text{ с}^{-1}$;
- вес электровоза $P = 72 \text{ Т}$;
- время прохождения состава по мосту 2 минуты.

Результаты расчета приведены на рис.13-15.

Анализ полученных результатов расчета

Результаты расчета середины балки при приведены на рис.13-15.

На рис. 13 приведено колебание середины балки при прохождении по ней поезда высокоскоростного движения со скоростью 120 километров в час. Из рисунка видно, что середина балки совершает гармонические колебания с максимальной амплитудой 1,2 миллиметра.

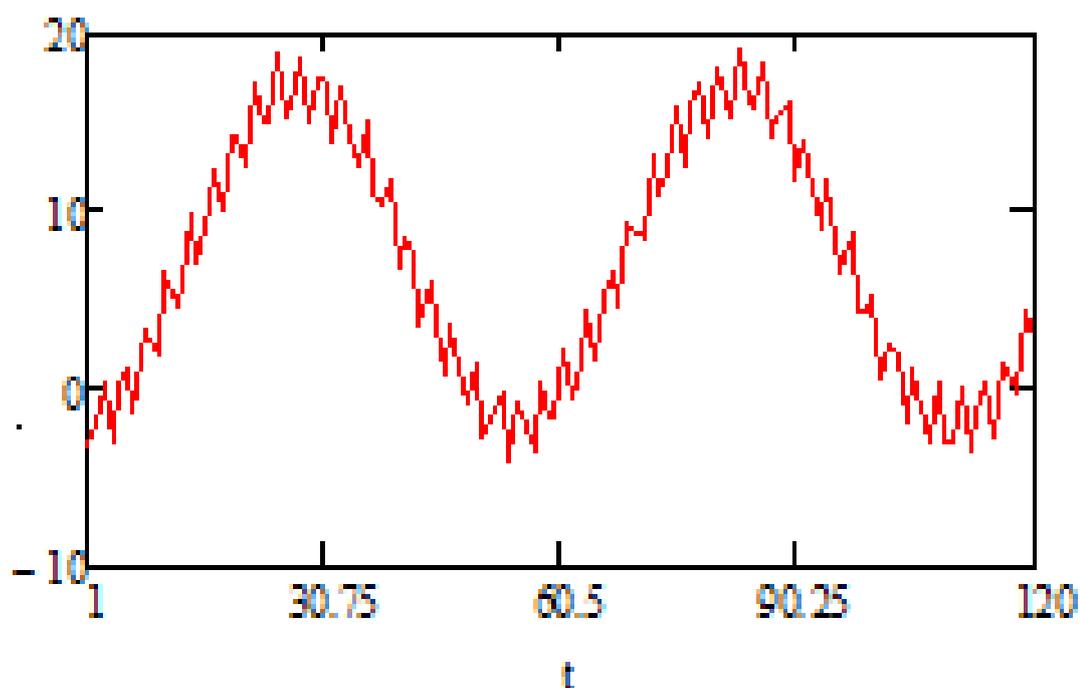


Рис. 13. График изменения прогиба середины балки во время прохождения состава по мосту при скорости движения поезда со скоростью 120 км/час.

На рис. 14 приведено колебание середины балки при прохождении по ней поезда высокоскоростного движения со скоростью 150 километров в час. Из рисунка видно, что середина балки совершает не гармонические колебания, а аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 1,5 миллиметра.

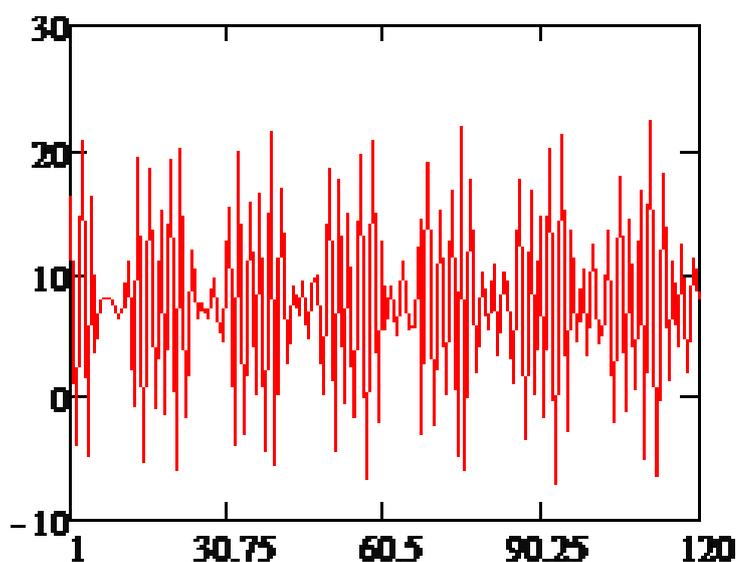


Рис. 14. График изменения прогиба середины балки во время прохождения состава по мосту при скорости движения поезда со скоростью 150 км/час.

На рис. 15 приведено колебание середины балки при прохождении по ней поезда высокоскоростного движения со скоростью 200 километров в час. Из рисунка видно, что середина балки совершает не гармонические колебания, а установившиеся аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 2,5 миллиметра.

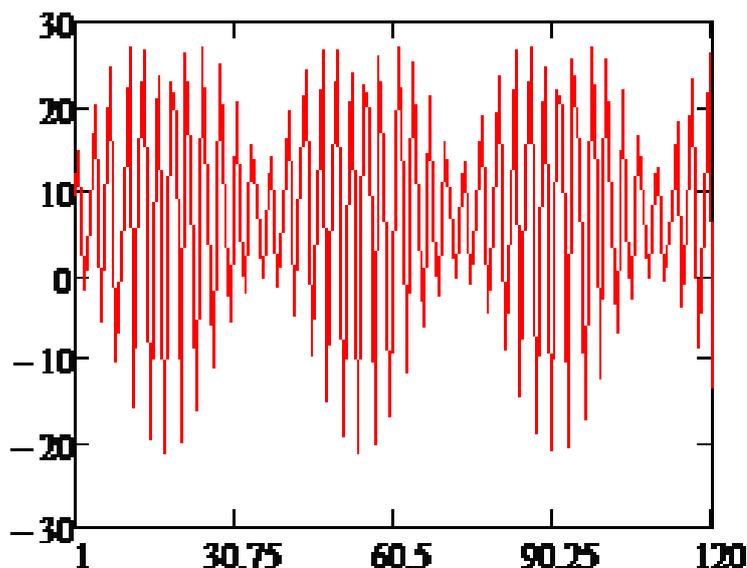


Рис. 15. График изменения прогиба середины балки во время прохождения состава по мосту при скорости движения поезда со скоростью 200 км/час.

Кроме вышеприведенного произведен расчет динамический коэффициента, когда по легкому балочному мосту со скоростью v перемещается тяжелый груз, по сравнению с которым массой моста возможно пренебречь. По расчету видно, что в зависимости от скорости движения состав динамический коэффициент изменяется пропорционально скорости движения.

Выводы по третьей главе

1. Используя компьютерную программу «MATCAD» произведен расчет середины балки железнодорожного железобетонного моста во время прохождения пассажирского высокоскоростного состава по мосту.

2. Определена зависимость динамического коэффициента от скорости движения подвижного состава.

3. Установлено, что при движении состава по мосту со скоростью 120 км/час балка совершает гармонические колебания с амплитудой 1,2 миллиметра.

4. При движения состава со скоростью 150 километров в час, середина балки совершает не гармонические колебания, а аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 1,5 миллиметра.

5. При движения состава со скоростью 200 километров в час, середина балки совершает установившиеся аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 2,5 миллиметра.

Выводы по диссертации в целом

1. Динамический коэффициент изменяется пропорционально скорости движения подвижного состава.

2. При движении состава по мосту со скоростью 120 км/час балка совершает гармонические колебания с амплитудой 1,2 миллиметра.

3. При движения состава со скоростью 150 километров в час, середина балки совершает не гармонические колебания, а аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 1,5 миллиметра.

4. При движения состава со скоростью 200 километров в час, середина балки совершает установившиеся аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 2,5 миллиметра.

5. При продолжительном действии возмущающей силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону $P_1 = P \sin \theta t$, система будет совершать колебания с частотой θ возмущающей силы.

6. Коэффициент динамичности для перемещений одновременно является коэффициентом динамичности и для напряжений.

7. При движения состава со скоростью 150 километров в час, середина балки совершает не гармонические колебания, а аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 1,5 миллиметра.

8. При движения состава со скоростью 200 километров в час, середина балки совершает установившиеся аритмические вибрационные движения с максимальной амплитудой 2,5 миллиметра.

Список литературы

1. КМК 2. 05. 03 – 97. Мосты и трубы. – Ташкент: Госкомархитекстрой Р. Уз., 2002. – 452 с.
2. Рекомендации по учету сейсмических воздействий при проектировании мостов. – М.: ЦНИИС, 1983. – 21 с.
3. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролётных строений железнодорожных мостов. М., Транспорт, 1989.
4. Рахманов Ў., Саминов И. А. Темир йўлларда кўприклар ва иншоотлар. Қурилиш йўналиши талабалари учун ўқув қўлланма.Т, ТашИИТ 2009 – 95б..
5. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролётных строений железнодорожных мостов. М., Транспорт, 1987.
6. Красин Н.А. Основы динамических и аэродинамических расчетов висячих и вантовых мостов. М.У. для магистров - Т, ТашИИТ 2001.
7. Инструкция по содержанию искусственных сооружений. ГИН 07-036-03/ Узгосжелдорнадзор, Ташкент, 2003.
8. Красин Н.А. Мамажанов Р.К. Примеры проектирования расчета балочного предварительно напряженного железнодорожного пролетного строения под железнодорожную нагрузку. ТашИИТ 2002.
9. Саминов И., Болтабаев М. Темир йулардаги темир бетон кўприкларни лойихалаш. – Т. ТашИИТ, 2005.

10. Красин Н.А. Современные способы проектирования, строительство и эксплуатации тоннелей и метрополитенов. 2-й сем. Учебное пособие Ташкент: Таш ИИТ, 2005 г.
11. Красин Н.А. Сейсмостойкость транспортных сооружений. Повреждения мостов, тоннелей, труб и подпорных стен при сильных землетрясения. Часть 3. Учебное пособие Ташкент : Таш ИИТ, 2005 г.
12. Красин Н.А. Сейсмостойкость транспортных искусственных сооружений. Часть 2. Учебное пособие Ташкент : Таш ИИТ, 2005 г.
13. Красин Н.А. Сейсмостойкость транспортных искусственных сооружений. Инженерная сейсмология. Часть 1. Учебное пособие Ташкент : Таш ИИТ, 2005 г.
14. Красин Н.А. Проектирование мостов, тоннелей и метрополитенов. Проектирование и расчет мостов на сейсмостойкость в различных странах. Учебное пособие Ташкент: Таш ИИТ, 2005 г.
15. КМК 2. 05. 03 – 97. Мосты и трубы. – Ташкент: Госкомархитекстрой Р. Уз., 2002. – 452 с.
16. Рекомендации по учету сейсмических воздействий при проектировании мостов. – М.: ЦНИИС, 1983. – 21 с.
17. <http://www.regnum.ru/news/1161264.html>.
18. <http://www.uzrailway.uz/arendaeng.html>
19. http://transler.ru/content/megdunarodnii_perevozki/
20. <http://www.12news.uz/news/author/admin/>
21. <http://ru.advisor.travel/city/2441088>
22. <http://ru.advisor.travel/city/Karshi-2441088/photos>
23. http://transler.ru/content/megdunarodnii_perevozki/