

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОПУСКА НАГРУЗКИ ПО АВТОДОРОЖНЫМ МОСТОВЫМ СООРУЖЕНИЯМ В РАМКАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АИС ИССО

В статье рассмотрены общие подходы к решению задачи определения условий пропуска нагрузки по автодорожным мостовым сооружениям. Обоснованы преимущества прямого перерасчета конструкций по сравнению с другими методиками. Показан расчетный алгоритм, основанный на механизме нагружения поверхностей влияния и реализованный в рамках автоматизированной информационной системы АИС ИССО.

Оценка возможности пропуска по мостам обращающейся, тяжеловесной и сверхнормативной нагрузок является основной и наиболее трудоемкой из тех задач, которые постоянно приходится решать при назначении режима эксплуатации сооружений и выдаче пропусков на проход тяжеловесной нагрузки. Как показывает опыт, во многих случаях пользователи автомобильных дорог получают отказ на пропуск тяжеловесной и сверхнормативной нагрузки по формальным признакам без учета реального воздействия данной нагрузки на сооружения. Тогда как на самом деле эта нагрузка может быть пропущена по мостам без какого-либо ущерба. Не исключены и обратные случаи, когда состояние моста не позволяет пропускать по нему обращающуюся нагрузку без угрозы возникновения аварийной ситуации, но сооружение продолжает эксплуатироваться в обычном режиме, поскольку оценить эти ситуации без проведения трудоемких и затратных расчетов не представляется возможным. Единственным способом решения данной проблемы является автоматизация всех необходимых расчетов, что позволит обеспечить достоверность принимаемых решений при назначении режимов эксплуатации сооружений и, как следствие, снижение финансовых и трудовых затрат при общем повышении эксплуатационной надежности мостов.

Сотрудниками лаборатории «Мосты» СГУПС разработана методика решения задачи условия пропуска тяжеловесной нагрузки по мостовым сооружениям в рамках автоматизированной системы АИС ИССО. На основе методики построены соответствующие расчетные алгоритмы, модернизирована структура базы данных АИС ИССО и созданы прикладные программные модули.

Грузоподъемность и условия пропуска нагрузки по мостовым сооружениям. Основные понятия

Помимо задачи проектирования — определения размеров элементов конструкции для пропуска проектной нагрузки — необходимость выполнения расчетов возникает при определении грузоподъемности сооружения и возможности пропуска заданной нагрузки по имеющейся конструкции. Обусловлено это следующим:

- на сети автомобильных дорог эксплуатируется множество сооружений, запроектированных по старым расчетным нормам под более легкие по сравнению с современными нагрузки;
- реально обращающиеся транспортные средства зачастую трудно соотнести с нормативными проектными нагрузками по их силовому воздействию на конструкции.

Грузоподъемность выражается через наибольшую массу транспортного средства определенного вида, которая может быть безопасно пропущена в транспортном потоке или одиночным порядком по сооружению с учетом его фактического состояния. Целью определения грузоподъемности является назначение режима движения по мосту транспортных средств по весовым параметрам и, в случае необходимости, регулирование движения посредством установки соответствующих знаков, ограничивающих массу, нагрузку на ось, скорость. В настоящее время расчеты грузоподъемности мостовых сооружений регламентируются следующими нормативными документами:

- ВСН 32-89. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений эксплуатируемых мостов;
- ВСН 112-73. Указания по определению грузоподъемности деревянных мостов с учетом их технического состояния;
- ВСН 36-84. Инструкция по определению грузоподъемности сталежелезобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов.

Согласно этим документам грузоподъемность для транспортного потока выражается в виде:

- массы эталонного трехосного грузовика, имеющего схему, аналогичную схеме нагрузки Н-30, и находящегося в составе колонны таких же автомобилей с интервалом 10 м;
- установленного класса К автомобильной нагрузки по схеме АК, приведенной в СНиП 2.05.03–84* и ГОСТ Р 52748–2007.

Грузоподъемность для тяжелой одиночной нагрузки выражают через массу эталонной четырехосной тележки по схеме, аналогичной проектной колесной нагрузке НК.

Для установления грузоподъемности элементов конструкций следует определить:

- предельно допустимые усилия для расчетных элементов $S_{\text{пред}}$;
- долю расчетных усилий от постоянной нагрузки $S_{\text{пост}}$, пешеходов на тротуарах $S_{\text{пеш}}$, прочих нагрузок $S_{\text{пр}}$, учитываемых совместно с вертикальной нагрузкой от транспортных средств;
- долю от предельных усилий, которую можно передать на подвижную временную нагрузку $S_{\text{врем}}$;
- допустимые значения веса подвижной временной вертикальной нагрузки по схеме эталонной (автомобильной, одиночной колесной) или допустимый класс нагрузки по схеме АК.

Допустимые значения веса эталонной подвижной нагрузки или допустимый класс нагрузки устанавливают, вычисляя усилия от этих нагрузок $S_{\text{вр}}$ и сопоставляя их с допустимым значением расчетного усилия $S_{\text{врем}}$ при соблюдении условия

$$S_{\text{вр}} \leq S_{\text{врем}} \quad (1)$$

Если грузоподъемность элементов сооружения выражается через нагрузки по схеме АК или эталонных транспортных средств, то долю расчетных усилий для временных нагрузок вычисляют для первого и второго случаев загрузки по СНиП 2.05.03–84*. Для первого случая, предусматривающего размещение нагрузки на ширине проезжей части, в которую не входят полосы безопасности, расчет производят по формуле

$$S_{\text{врем}} = S_{\text{пред}} - S_{\text{пост}} - S_{\text{пеш}} - S_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Для второго случая, когда движение по сооружению осуществляется в том числе и по полосам безопасности (например, временно при производстве ремонтных работ и т.д.), нагрузку от пешеходов на тротуаре в формуле (2) не учитывают.

Если грузоподъемность сооружения выражается через одиночную нагрузку по схеме НК, то допускаемые значения расчетных усилий от временных нагрузок вычисляются по формуле (2) без учета нагрузки от пешеходов, т.е.

$$S_{\text{врем}} = S_{\text{пред}} - S_{\text{пост}} - S_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Коэффициент надежности, динамический коэффициент, коэффициент полноты и другие принимают согласно действующему СНиП 2.05.03–84*.

Задача определения возможности (условий) пропуска произвольной нагрузки по мостовому сооружению весьма схожа с задачей определения грузоподъемности, но имеет при этом свои особенности. Во-первых, реальная нагрузка по всем учитываемым в расчетах параметрам может существенно отличаться от эталонных и проектных нагрузок. Во-вторых, если при расчетах грузоподъемности возможное положение эталонных нагрузок на проезжей части достаточно четко определено, то одним из итогов решения задачи условий пропуска как раз и является определение допускаемого расположения реальной нагрузки, обеспечивающего ее пропуск по сооружению в пределах ширины проезда.

В настоящее время все известные подходы к решению задачи определения условий пропуска могут быть сведены в три основные группы.

1. Определение прямым перерасчетом усилий от всей совокупности нагрузок, включая нагрузку от рассматриваемых транспортных средств, и сопоставление этих усилий с полной несущей способностью. Вариантом такого расчета может быть расчет усилий от воздействия транспортных средств и сравнение с полезной несущей способностью конструкции.

2. Сравнение воздействия от рассматриваемой нагрузки с воздействием от расчетной проектной нагрузки.

3. Использование метода классификации по грузоподъемности.

Первый подход позволяет получить наиболее точные и полные решения, но, соответственно, требует большего объема необходимых исходных данных и больших трудозатрат.

Использование второго подхода позволяет обойтись без сведений о действительной несущей способности элементов конструкции, а также не учитывать влияния постоянных и прочих нагрузок. Однако точность полученного результата может не обеспечить принятие правильного решения. Возможны две противоположные ситуации. С одной стороны, реальные конструкции, построенные с привязкой к типовым проектам, зачастую имеют значительные запасы несущей способности по сравнению с проектной нагрузкой. Например, типовым проектом пролетных строений для восприятия проектной нагрузки при минимально допустимом габарите проезжей части в поперечном сечении предусмотрено пять железобетонных балок, а большинство построенных по этому проекту мостов с учетом действительной категории дорог и наличием полос безопасности имеют в поперечном сечении не менее шести балок. Понятно, что несущая способность таких пролетных строений позволяет воспринимать более тяжелые временные нагрузки по сравнению с проектными. Несущая способность опор

при этом также может быть завышена за счет того, что их размеры определены конструктивными требованиями, а не прочностными расчетами. В этой ситуации запасы прочности не будут учтены, а пропуск нагрузки необоснованно запрещен. С другой стороны, элементы конструкций могут иметь повреждения или отклонения от первоначального проекта, приводящие к снижению их несущей способности. В этом случае разрешение на пропуск транспортных средств может повлечь перегруз и разрушение конструкций.

При отсутствии сведений о действительной несущей способности можно получить и более точные результаты решения задачи условий пропуска. Это, конечно, повлечет увеличение трудозатрат на расчеты, поскольку подразумевает все-таки совместный учет во втором подходе воздействия и от временных и от постоянных нагрузок. В этом случае за полную несущую способность следует принимать суммарное воздействие от проектной нагрузки и от прочих нагрузок, определяемое по правилам тех расчетных норм, по которым конструкция запроектирована, и с проектной интенсивностью нормативных постоянных нагрузок без учета их возможного возрастания за период эксплуатации (дополнительные слои дорожной одежды и т.д.). В случае если конструкция запроектирована по методу предельных состояний (нормы СН200-62 и позже), воздействие от совокупности реальных нагрузок следует определять по действующему СНиП 2.05.03–84*. В случае если конструкция была запроектирована по допускаемым напряжениям, воздействие от совокупности реальных нагрузок следует определять с учетом их расстановки по действующему СНиП 2.05.03–84*, но без учета коэффициентов надежности по нагрузке и с динамическим коэффициентом, аналогичным принятому в тех нормах, по которым конструкция запроектирована.

Третий подход — метод классификации — является производным от метода прямого перерасчета. В отличие от традиционного способа перерасчета, когда проверяется неравенство $S_{вр} \leq S_{врем}$, при классификации проверяют неравенство, получаемое делением правой и левой его частей на усилие от эталонной нагрузки

$$K_{вр} = S_{вр} / S_{э} \leq K_{врем} = S_{врем} / S_{э}, \quad (4)$$

где $K_{вр}$ — класс временной нагрузки; $K_{врем}$ — класс элемента (сечения).

В настоящее время предпринимается попытка адаптировать этот метод, широко используемый в железнодорожной практике, к автодорожным мостам. Уже существует проект Рекомендаций по определению грузоподъемности мостовых сооружений на автомобильных дорогах, регламентирующих систему назначения классов грузоподъемности мостовых сооружений, утверждение которого в качестве нормативного документа пока откладывается в связи с его недоработанностью для практического применения. Основным показателем грузоподъемности мостового сооружения при использовании метода классификации является фактический класс нагрузки. Грузоподъемность устанавливают для неконтролируемого режима движения по классам нагрузки АК и НК, а также по общей массе эталонных транспортных средств.

Класс нагрузки по схеме загрузки «АК» определяют для случаев загрузки, принятых в СНиП 2.05.03–84* и ГОСТ Р 52748–2007. Нагрузка по схеме «АК» на конструкции мостового сооружения принята в виде равномерно-распределенной нагрузки с интенсивностью «К» кН/м (или 0,1 Кт/м) и одной двухосной тележки с нагрузкой на ось 10К кН (или 1К тс) для каждой полосы

движения. При этом тележка устанавливается в наиболее невыгодное положение на длине учитываемого участка нагружения. Коэффициент надежности, динамический коэффициент, коэффициент полосности и другие коэффициенты принимают согласно действующему СНиП 2.05.03–84*.

При определении грузоподъемности по нагрузке НК (4-осная колесная нагрузка) схема загрузки выполняется согласно СНиП 2.05.03–84* и ГОСТ Р 52748–2007, а для мостовых сооружений, построенных по другим расчетным нормам (СН-200-62 и раньше), ось нагрузки НК устанавливается не ближе 2 м от ограждения (бордюра).

Грузоподъемность по общей массе и осевой нагрузке, предназначенной для установки дорожных знаков на дороге, определяют для шести эталонных схем 2–7-осных транспортных средств.

При расчете эталонную нагрузку устанавливают в колонну однотипных транспортных средств на расстоянии от 10 до 22 м друг от друга (расстояние от последней оси переднего транспортного средства до первой оси последующего транспортного средства) в зависимости от типа эталонной схемы, а по ширине ездового полотна как для нагрузки АК. Допускаемая общая масса каждого эталонного транспортного средства (грузоподъемность) определяется путем сопоставления усилий, возникающих от эталонной нагрузки с фактическим классом нагрузки для сечения. Сопоставление этих усилий выполняют без учета коэффициентов надежности, полосности и динамического. Для наиболее распространенных видов пролетных строений мостовых сооружений грузоподъемность их по общей массе эталонного транспортного средства определяют по формуле

$$m_m = \frac{K_{\phi}}{K_{A11}} m_{A11} = \frac{K_{\phi}}{11} m_{A11}, \quad (5)$$

где m_m — грузоподъемность по общей массе эталонного транспортного средства для моста; K_{ϕ} — фактический класс нагрузки сооружения; K_{A11} — класс нагрузки $K_{A11} = 11$; m_{A11} — допустимая общая масса эталонного транспортного средства для случая, когда класс по грузоподъемности сооружения равен А11.

Вообще достоинство метода классификации заключается в том, что расчет разделяется на две части. Первая часть — расчет классов элементов конкретной конструкции, который осуществляется квалифицированными специалистами достаточно редко (при изменении состояния конструкций или расчетной методики) с применением наиболее совершенных методов расчета. Вторая часть — расчет классов нагрузки, который может быть выполнен упрощенными способами. Такое разделение при появлении новой нагрузки не требует перерасчета всего сооружения. Кроме того, для сопоставления воздействия от подвижной нагрузки с полезной несущей способностью произвольного элемента конструкции вне зависимости от выполняемой проверки применяются не зависящие от системы физических единиц безразмерные величины — классы, что дает возможность сравнивать по грузоподъемности разнотипные элементы конструкций и нагрузки.

Однако следует помнить, что класс элемента по эталонным нагрузкам устанавливают для наиболее невыгодного размещения этих нагрузок на проезжей части. Фактически, это минимальный класс. Но если передвинуть эталонную нагрузку в соседнее положение, то формально вычисляемый класс элемента

изменится. То есть класс элемента зависит от принятого размещения эталонной нагрузки и может принимать множество значений — от минимального до максимального в определенном диапазоне. В случае если при определении условий пропуска конкретной нагрузки с использованием метода классификации выясняется, что класс этой нагрузки превышает минимальный класс элемента, из этого не следует автоматически, что пропуск нагрузки невозможен. Не исключено, что нагрузка все-таки может быть пропущена, но с ограничением возможного диапазона размещения поперек проезжей части. То есть должен быть известен весь диапазон возможных классов элемента в зависимости от положения эталонной нагрузки. Такие данные могут быть получены только дополнительными вычислениями. С учетом того, что классы элемента должны определяться для нескольких эталонных нагрузок, основное преимущество метода классификации по грузоподъемности при использовании его в решении задачи условия пропуска по сравнению с прямым перерасчетом практически исчезает.

Таким образом, наиболее оптимальным подходом к решению задачи условия пропуска нагрузки по мостам при автоматизации этого процесса представляется способ прямого перерасчета усилий в элементах конструкции и сравнения с несущей способностью этих элементов.

Мостовые сооружения рассчитывают по методу предельных состояний в соответствии с действующим СНиП 2.05.03–84*. При этом существует множество методик и способов расчета элементов конструкции, зависящих как от особенностей самих конструкций, так и от выбранных расчетных схем, реализующих тот или иной подход к решению конкретной задачи. Отличаются все эти методики различной сложностью выполнения расчетов и, в конечном итоге, точностью полученных результатов и степенью соответствия этих результатов реальной работе сооружения под нагрузкой.

Автоматизация определения условий пропуска нагрузки по мостам может быть решена как созданием алгоритмов, построенных на инженерных методиках расчета для частных случаев, так и реализацией общего подхода, использующего единый алгоритм. Таким подходом может быть определение усилий в конструкциях от временных нагрузок способом загрузки поверхностей влияния. Получение поверхности влияния произвольного усилия в произвольном элементе конструкции является, без сомнения, более сложной задачей по сравнению с широко используемыми инженерными методиками. Однако, учитывая уровень развития численных методов расчета и соответствующего программного обеспечения, именно этот подход выглядит наиболее предпочтительным для реализации в АИС ИССО.

В рамках АИС ИССО предполагается возможность решения двух основных задач:

- определение грузоподъемности сооружения как минимальной грузоподъемности его элементов, выраженной через эталонные нагрузки;
- определение возможности пропуска по сооружению произвольной нагрузки, включая ограничения скоростного режима и допустимого положения нагрузки по ширине проезжей части, если неконтролируемый пропуск этой нагрузки невозможен.

При определении грузоподъемности и условий пропуска по мостовому сооружению произвольной нагрузки в общем случае должны быть проверены все элементы несущих конструкций, входящие в состав следующих частей сооружения:

- пролетные строения, включая элементы проезжей части;
- опорные части;
- опоры;
- фундаменты.

Соответственно для получения полностью достоверного результата данные для расчета должны быть сформированы для каждого несущего элемента. При этом для каждого элемента конструкции в общем случае может быть выполнено несколько расчетных проверок на различные силовые воздействия от внешних нагрузок.

В случае отсутствия полных данных расчеты могут быть проведены только для тех элементов, по которым необходимые данные имеются. Условия пропуска при этом будут определены только для рассчитываемых элементов. Если заранее известно несущей способностью какого именно элемента конструкции определяется грузоподъемность сооружения в целом, расчет может быть произведен только по этому элементу.

Возможность пропуска по сооружению произвольной нагрузки проверяется выполнением неравенства (1) для каждого рассчитываемого элемента несущей конструкции.

Предельная несущая способность элемента $S_{пред}$ задается по имеющимся проектным данным или определяется расчетом, выполняемым вне рамок АИС ИССО.

Расчетные усилия от действия всех учитываемых нагрузок для рассчитываемых элементов определяются путем загрузки поверхностей влияния соответствующих усилий с учетом необходимых коэффициентов надежности, коэффициента динамического, коэффициента полосности и пр.

В общем случае параметры поверхности влияния произвольного усилия, хранящиеся в базе данных в виде массива координат, определяются вне рамок АИС ИССО. Это отдельная задача, которая должна решаться с использованием специальных расчетных программных комплексов. Таких комплексов достаточно много, и специалистам, занимающимся расчетами сооружений, они известны. Право выбора того или иного комплекса в каждом конкретном случае остается за ответственным лицом, подготавливающим данные для решения задачи условий пропуска нагрузки. Для частных случаев железобетонных балочных разрезных пролетных строений параметры поверхности влияния могут рассчитываться автоматически по имеющимся в базе данных АИС ИССО конструктивным характеристикам.

Постоянные нагрузки считаются, как правило, равномерно распределенными и хранятся в базе данных как интенсивность на квадратный метр поверхности влияния. Интенсивность постоянной равномерно распределенной нагрузки для частных случаев может быть вычислена и размещена в базе данных автоматически. Расчетное усилие от постоянных нагрузок в элементе конструкции определяется по формуле

$$S_{\text{пост}} = \sum \gamma_{fi} g_i \omega_i, \quad (6)$$

где γ_{fi} — коэффициенты надежности к учитываемым постоянным нагрузкам (СНиП 2.05.03–84*, п. 2.10*). Если получены действительные данные по собственному весу и размерам конструкций пролетных строений и опор, допускается принимать для элементов несущих конструкций $\gamma_f = 1,05$, а для слоев одежды мостового полотна $\gamma_f = 1,15$; g_i — интенсивность учитываемых постоянных нагрузок, т/м²; ω_i — объем поверхности влияния усилия под зоной действия каждой постоянной нагрузки, м³.

В случае наличия дополнительной постоянной нагрузки, приложенной к конструкции сосредоточенно, информация об ее интенсивности и размещении на поверхности влияния вводится в базу данных отдельно.

Пешеходная нагрузка на тротуарах при необходимости ее учета считается равномерно распределенной и хранится в базе данных как интенсивность на квадратный метр поверхности влияния с указанием ее размещения на поверхности влияния. Интенсивность пешеходной нагрузки определяется автоматически в соответствии с требованиями СНиП 2.05.03–84* и учетом длины загрузки поверхности влияния. Расчетное усилие от пешеходной нагрузки в рассчитываемом элементе определяется по формуле

$$S_{\text{пеш}} = \gamma_{f\text{пеш}} g_{\text{пеш}} \sum \omega_{i\text{пеш}}, \quad (7)$$

где $\gamma_{f\text{пеш}} = 1,2$ — коэффициент надежности к пешеходной нагрузке при совместном учете с временной вертикальной нагрузкой; $g_{\text{пеш}} = (0,4 \dots 0,002)\lambda$, но не менее 0,2 т/м² — интенсивность учитываемой пешеходной нагрузки, т/м² (λ — суммарная длина участков загрузки поверхности влияния, м); $\omega_{i\text{пеш}}$ — объем поверхности влияния усилия под зоной действия пешеходной нагрузки, м³.

Усилия в элементе от прочих нагрузок $S_{\text{пр}}$ при необходимости их учета определяются предварительным расчетом вне рамок АИС ИССО.

Усилия от действия заданных вертикальных временных колесных нагрузок при различных положениях поперек проезжей части определяются в рамках АИС ИССО специальной процедурой «прокатки» схемы нагрузки по поверхности влияния. При наличии полос положительных и отрицательных участков вдоль поверхности влияния усилие от распределенной нагрузки по схеме АК определяется загрузкой полосовой нагрузкой участков поверхности влияния одного знака. Усилия от временных нагрузок определяются при их статическом действии и с учетом динамики для выявления возможности пропуска с ограничением скорости.

Для хранения необходимой исходной информации для каждой расчетной проверки предусмотрен специальный раздел базы данных с таблицами соответствующей структуры. Данные в эти таблицы заносятся посредством специального программного обеспечения. Часть данных либо формируется автоматически по информации конструктивного описания сооружения, либо конвертируется из специального файла определенного шаблона. Другая часть данных вносится в диалоговом режиме. Все исходные данные для расчета, хранящиеся в базе данных, могут быть просмотрены и отредактированы в диалоговом режиме.

Расчеты могут выполняться как для отдельного сооружения, так и для группы сооружений.

В результате выполнения расчетов формируются стандартные отчеты, содержащие информацию о грузоподъемности рассчитываемых элементов каж-

дого сооружения, либо о возможности и условиях пропуска заданной нагрузки по каждому сооружению.

Расчетное усилие от временной вертикальной нагрузки в рассчитываемом элементе определяется по формуле

$$S_{\text{н}} = (1 + \mu) \gamma_{\text{fn}} (\sum s_1 p_k a_k + g_{\text{н}} \sum s_1 \omega_{\text{ин}}), \quad (8)$$

где $(1 + \mu)$ — динамический коэффициент (СНиП 2.05.03–84*, п. 2.22*); γ_{fn} — коэффициенты надежности к временной нагрузке (СНиП 2.05.03–84*, п. 2.23*); s_1 — коэффициент полосности (СНиП 2.05.03–84*, п. 2.14); p_k — давление на k -е колесо временной нагрузки; a_k — ордината поверхности влияния усилия под k -м колесом; $g_{\text{н}}$ — интенсивность распределенной временной нагрузки, т/м²; $\omega_{\text{ин}}$ — объем поверхности влияния усилия под зоной действия распределенной временной нагрузки, м³.

Грузоподъемность рассчитываемых элементов выражается классами через эталонные нагрузки по формуле

$$K = \frac{S_{\text{врем}}}{S_{\text{н}}} K_{\text{э}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{э}} = 11$ — для нагрузки А11; $K_{\text{э}} = 30$ — для эталонных грузовиков по схеме Н-30; $K_{\text{э}} = 80$ — для колесной нагрузки по схеме НК-80.

Особенности определения усилий от временной нагрузки

Усилие в рассчитываемом элементе от заданной временной нагрузки определяется ее положением на проезжей части. Невыгоднейшее положение, создающее максимальное усилие, зависит от конфигурации поверхности влияния. Для автодорожных мостов искать положение, при котором нагрузка создает максимальное усилие, используя алгоритм стандартной прокатки по линии влияния, не представляется возможным. Алгоритм прокатки подразумевает, что нагрузка устанавливается в фиксированном продольном створе на проезжей части и начинает последовательно сдвигаться с определенным шагом. В каждом положении вычисляется усилие, создаваемое нагрузкой. Для автодорожного моста нагрузку нужно двигать как вдоль, так и поперек моста. Если выбрать шаг сдвижки 10 см, то при поверхности влияния длиной 50 м и шириной 20 м требуется вычислить усилие, создаваемое только одной подвижной единицей $500 \cdot 200 = 100\,000$ раз. При выполнении вычислений в одной точке за одну миллисекунду на все вычисления потребуется 2 с. Если в колонне подвижных единиц две, то алгоритм прокатки выполняет установку одной подвижной единицы и последовательную расстановку второй подвижной единицы во всех возможных положениях с учетом минимально допустимого интервала. Далее сдвигается первая нагрузка и опять прокатывается вторая. И так далее. В итоге потребуется 10^{10} операций вычисления усилий, что займет двое суток. Понятно, что этот вариант алгоритма не приемлем.

Для оптимизации решения был разработан алгоритм, в который заложены основные принципы установки транспортных средств на проезжей части, используемые при расчете усилий по линиям влияния. Основное правило — установка транспортных средств выполняется таким образом, чтобы они колесными осями попадали на экстремумы (точки перегиба) линии влияния. Из этого правила вытекают следующие требования: во-первых, установка нагрузки осуществляется на линии влияния, т.е. необходимо выбрать сечение поверхно-

сти влияния вдоль моста и выполнять расстановку вдоль этого сечения. Во-вторых, для проверки условий пропуска на поверхности всего сооружения необходимо выбрать серию сечений поперек оси моста с определенным шагом, в каждом из которых выполнить расстановку нагрузки.

Поверхность влияния (рис. 1) описывается массивом координат $[x_{ij}, y_{ij}, a_{ij}]$. Где x_{ij}, y_{ij} — координаты точки на плоскости (в плане), a_{ij} — значение усилия от единичной нагрузки, установленной в данной точке. Точки на плоскости могут быть расположены в произвольном порядке, хотя в большинстве случаев поверхность задается так, что точки лежат в узлах прямоугольной сетки.

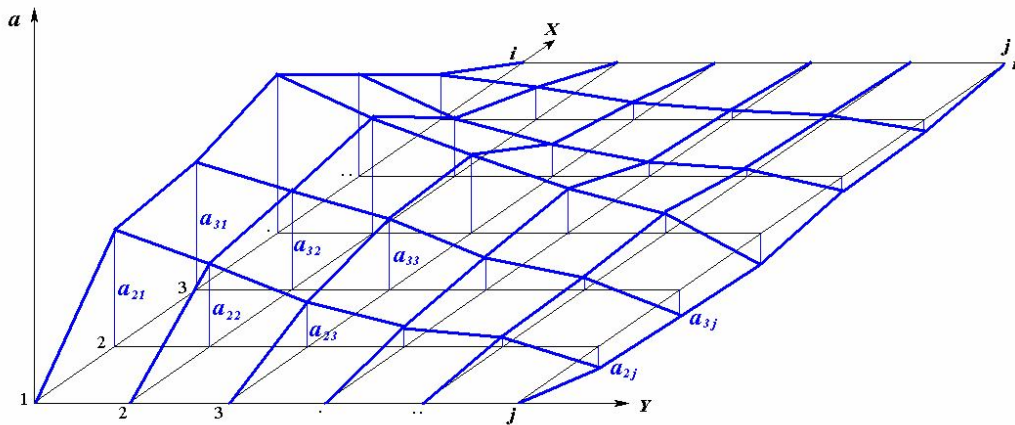


Рис. 1. Поверхность влияния

Для того чтобы иметь возможность получить сечение поверхности влияния в произвольном месте, необходимо преобразовать поверхность — соединить точки линиями (в исходных данных нет информации о соединении точек поверхности). Для выполнения этой операции в системе используется алгоритм триангуляции Делони. Алгоритм триангуляции соединяет точки на плоскости (в плане) линиями так, чтобы линии образовывали набор треугольников. При этом используется критерий Делони, который обеспечивает оптимальное разбиение, однако он имеет свои ограничения.

Как уже говорилось, в большинстве случаев данные, загружаемые в систему, имеют регулярный характер, т.е. значения усилий располагаются в узлах прямоугольной сетки. Такой вариант представления данных с точки зрения алгоритма Делони является наихудшим, потому как критерию Делони удовлетворяет и вариант 1 и вариант 2 (рис. 2). Если речь идет о плоской модели — оба варианта равнозначны. Однако в пространстве два этих варианта уже имеют различия. У варианта 2 диагональная линия находится ниже, чем в варианте 1. Поэтому если расsects вертикальной плоскостью эту фигуру — пересечение вертикальной плоскости и диагональной линии в первом случае даст значение вертикальной координаты больше, чем во втором. Ну и наконец можно заметить, что поверхность, полученная в результате триангуляции, отличается от реальной поверхности.

Для уменьшения влияния этих факторов алгоритм триангуляции модифицирован следующим образом. Во-первых, проверяется регулярность сетки, в которой заданы координаты поверхности влияния. Во-вторых, проверяется ее симметричность относительно линии, проходящей через ее центр и перпендику-

лярной оси моста. Если оба этих условия соблюдаются, то выполняется триангуляция первой половины поверхности, вторая половина получается отражением триангулированной части.

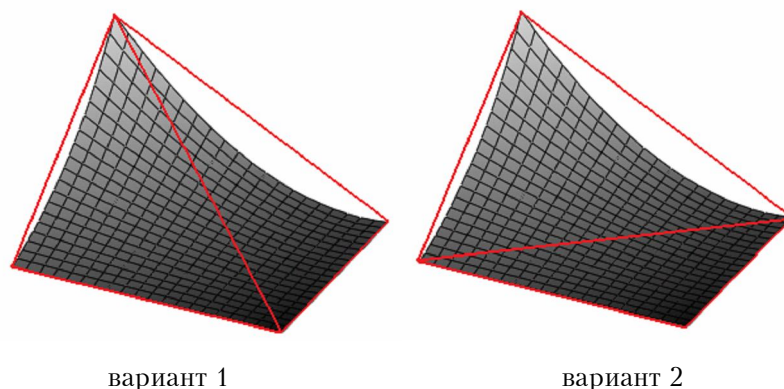


Рис. 2. Триангуляция Делони

После осуществления триангуляции мы получаем возможность выполнять сечение поверхности. Для получения сечения алгоритм выбирает линии, проходящие через секущую плоскость, и вычисляет координаты пересечения линии и плоскости. Соединяя эти точки, создаем линию влияния в данном сечении. Однако такая линия влияния далека от идеальной вследствие того, что данные для нее получены опосредованно — с помощью алгоритма триангуляции. Номинально плавная линия влияния имеет на этой стадии пилообразный вид. Количество расстановок нагрузки на линии влияния зависит от количества экстремумов — точек перегиба линии. Если линия имеет пилообразный вид — таких точек перегиба будет в разы больше, чем на самом деле. Для получения реальных экстремумов линия влияния сглаживается по методу Гаусса. Такое сглаживание не смещает положение основных точек перегиба, но убирает выбросы, полученные за счет процедуры триангуляции. На рис. 3 тонкой линией показана линия влияния до применения сглаживания, толстой — после. После выполнения сглаживания и определения экстремумов линия влияния готова к установке на ней нагрузки.

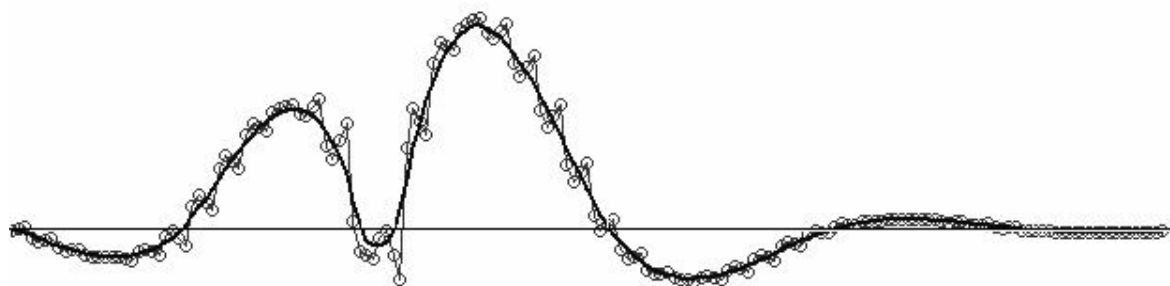


Рис. 3. Сглаживание линии влияния методом Гаусса

Процедура размещения нагрузки на линии влияния моделирует основное правило — нагрузка устанавливается своими осями в экстремумы линии влияния. Начинается алгоритм с того, что первое транспортное средство (ТС) устанавливается своей первой осью в первый экстремум линии влияния. При таком положении первого ТС устанавливается второе. При этом если имеются экстремумы, то второе ТС устанавливается в экстремумы также первой своей осью. При отсутствии других экстремумов — на минимально установленной дистанции к первому транспортному средству. И так далее. Когда вариантов более не остается — первое транспортное средство перемещается так, что устанавливается второй своей осью в первый экстремум, и процедура продолжается. После того как все варианты исчерпаны, выбирается тот, при котором создается максимальное усилие. В результате применения такого алгоритма количество положений транспортных средств, в которых необходимо выполнять расчет усилий, резко сокращается по сравнению с алгоритмом последовательного перебора всех возможных вариантов при стандартной прокатке.

Таким образом выполняется установка транспортных средств во всех назначенных продольных створах по ширине проезжей части от крайнего левого возможного положения до крайнего правого с шагом 10 см. На основании данных по створам выполняется поиск положений колонн, которые суммарно создают максимальное усилие. Для этого строится «виртуальная линия влияния» поперечного давления, которая описывает усилие, создаваемое колоннами ТС в зависимости от их размещения поперек оси проезжей части — горизонтальная координата описывает положение колонны поперек моста, вертикальная координата — значение усилия, создаваемого этой колонной. Строится «виртуальное ТС», которое имеет продольную осевую схему, соответствующую поперечной осевой схеме расставляемой нагрузки. Такая нагрузка размещается на «виртуальной линии влияния» с дистанцией, соответствующей заданному интервалу между колоннами, а количество таких ТС не должно превышать количество колонн.

Результатом работы алгоритма является схема расположения транспортных средств на проезжей части, при котором создается максимальное усилие и значение этого усилия. Схема расположения ТС включает в себя перечень колонн (их положение) и перечень (положение) транспортных средств в каждой колонне.