

5 Бирюк, В. А. Неразрушающие методы контроля агрегатов и узлов пожарной аварийно-спасательной техники / В. А. Бирюк, В. Н. Пасовец, М. М. Журов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 387–396. – DOI : <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.389>.

6 Предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с деструкцией фундаментов и надфундаментных конструкций зданий и сооружений / В. Н. Пасовец [и др.] // Промышленная безопасность и охрана труда: практика, обучение, инновации : сб. материалов Междунар. заочной науч.-практ. конф. – Минск : Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, 2019. – С. 67–70.

УДК 620.178

РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

Е. В. КОДНЯНКО

*ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения
с опытным производством», г. Солигорск, Республика Беларусь*

Д. А. ЧЕРНОУС

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время в узлах трения различных механизмов и конструкций широко используются детали с покрытиями. Если жесткость материала покрытия много меньше жесткости основного материала детали (полимерные антифрикционные покрытия), то при решении контактных задач такую деталь можно рассматривать как абсолютно твердое тело с деформируемой периферией [1]. При практических расчетах для описания деформирования этой периферии часто используют различные упрощенные модели. Одной из таких моделей является модель основания Винклера [2]. В рамках модели Винклера, в частности, получена оценка момента сопротивления качению в покое с учетом нарушения симметрии распределения контактного давления при приложении к опоре качения малого крутящего момента [2]. Однако ранее рассматривался только режим свободного качения при отсутствии сдвиговой (параллельной опорной поверхности) силы, что существенно сужает область применения разработанной методики. Анализ влияния сдвиговой силы на механические параметры опор качения посвящено множество фундаментальных и прикладных работ. В рамках классической теории качения [3], изложенной в данных работах, при рассмотрении линейно упругого деформирования материалов контактирующих тел наличие приложенной к опоре качения пары сил не сказывается на распределении контактного давления. Подобный подход не позволяет достоверно прогнозировать параметры напряженно-деформированного состояния в области контакта опоры качения с опорной поверхностью.

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования является разработка математической модели контакта опоры качения с поверхностью, основанной на ранее предложенной методике расчетного определения момента сопротивления качению в покое и позволяющей рассматривать произвольный режим силового нагружения рассматриваемого объекта.

Как и в работе [2], в качестве упрощенной структурной модели опоры качения рассмотрим абсолютно жесткий цилиндр с длиной образующей l , радиусом R и деформируемой периферией толщины h . Цилиндр находится в контакте с горизонтальной недеформируемой опорной поверхностью. На цилиндр действует вертикальная сила P , направленная к опорной поверхности, горизонтальная сила F и пара сил с моментом $M_{пр}$. Деформируемая периферия образована изотропным линейно-упругим материалом, характеризующимся модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν .

Под действием силы P центр опоры качения смещается к опорной поверхности на u_{n0} . При этом образуется область контакта полушириной a . Вертикальные смещения точек поверхности покрытия, находящихся в данной области, зависят от координаты x следующим образом:

$$u_n(x) = u_{n0} - \frac{x^2}{2R}.$$

Ось x направлена по опорной поверхности перпендикулярно образующей цилиндра. Начало координат соответствует центру области контакта.

Толщина h покрытия считается достаточно малой ($h \ll a$) для того, чтобы при решении контактной задачи могла использоваться модель основания Винклера. При этом контактное давление p определяется вертикальными смещениями u_n точек поверхности покрытия, а сдвиговое напряжение τ в области контакта – горизонтальными смещениями u_τ этих точек. Коэффициенты нормальной k_n и сдвиговой k_τ жесткости выражаются через упругие характеристики материала и толщину деформируемой периферии [1]. На границах области контакта давление p принимает нулевые значения. Данное условие позволяет установить связь максимального вертикального смещения с полушириной a . При заданном значении вертикальной силы P смещение u_{n0} определяется из уравнения равновесия опоры качения в проекциях на вертикальную ось.

Как было показано в работе [2], при действии на описанную модель пары сил с моментом M_d , не превышающим момента сопротивления качению в покое M_{c0} , распределение вертикальных смещений изменяется и принимает вид

$$u_{nM}(x) = u_{n0} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \left(1 - \gamma \frac{x}{a} \right), \quad \gamma = \frac{M_d}{M_{c0}} = \frac{M_{пр} - FR}{M_{c0}}.$$

Момент M_{c0} определяется из моментного условия равновесия опоры качения при $\gamma = 1$.

В области контакта выделяются зоны сцепления и проскальзывания. В зоне проскальзывания выполняется закон Кулона $\tau = fp$. Здесь f – коэффициент трения между поверхностью покрытия и опорной поверхностью. В зоне сцепления выполняется условие постоянства деформации ε_{xx} [3]. При этом $u_\tau = C_1 + C_2x$. Здесь C_1, C_2 – некоторые независимые от координаты x величины.

Известно [3], что при качении зона сцепления распространяется до границы области контакта, соответствующей направлению качения. Поэтому в рамках используемой модели основания Винклера соотношение для горизонтального смещения можно переписать в виде

$$u_\tau(x) = u_{\tau 0} \left(1 - \gamma \frac{x}{a} \right),$$

где $u_{\tau 0}$ – горизонтальное смещение точки поверхности покрытия в центре области контакта.

При заданном значении горизонтальной силы F смещение $u_{\tau 0}$ определяется из условия равновесия опоры качения в проекциях на горизонтальную ось:

$$F = l \int_{-a}^a \tau dx = l \left(\int_{-a}^{-d_1} fk_n u_{nM}(x) dx + \int_{-d_1}^{d_2} k_\tau u_\tau(x) dx + \int_{d_2}^a fk_n u_{nM}(x) dx \right),$$

где d_1, d_2 – длины отрезков, определяющих размер зоны сцепления.

На границе зоны сцепления выполняется закон Кулона

$$fk_n u_{nM}(-d_1) = k_\tau u_\tau(-d_1), \quad fk_n u_{nM}(d_2) = k_\tau u_\tau(d_2).$$

Три последних соотношения составляют систему нелинейных уравнений для нахождения неизвестных d_1, d_2 и $u_{\tau 0}$. После решения данной системы определяется распределение сдвигового напряжения в области контакта и общая ширина зоны сцепления.

В качестве примера использования разработанной математической модели выбран стальной ролик радиусом $R = 0,15$ м и шириной $l = 0,08$ м с полиуретановым покрытием толщиной $h = 0,03$ м. Сила прижатия ролика $P = 100$ Н. Данный набор значений параметров соответствует ролику скипа, перемещающегося по проводникам скипо-клетового ствола № 2 1РУ ОАО «Беларуськалий». Значения упругих характеристик материала покрытия $E = 5$ МПа, $\nu = 0,47$. Коэффициент трения покрытия со стальной опорной поверхностью составляет $f = 0,1$.

Рассматривался ведущий режим качения, при фиксированном значении горизонтальной силы, направленной противоположно направлению качения, и различных значениях приложенного момента. Минимальное значение $M_{пр}$ соответствует отсутствию действующего момента, максимальное – началу качения.

В результате расчетов установлено, что нарушение симметрии распределения контактного давления при приложении к опоре качения вращающего момента оказывает также существенное влияние и на распределение сдвигового напряжения в области контакта. При этом максимальное значение сдвигового напряжения практически линейно возрастает с увеличением действующего момента

и в рассмотренном примере в момент начала качения в 2 раза превышает соответствующее значение, вычисленное без учета указанной асимметрии. Кроме того, увеличение действующего момента приводит к уменьшению ширины зоны сцепления.

Список литературы

- 1 Вильке, В. Г. Стационарный режим качения колеса с вязкоупругой периферией / В. Г. Вильке, В. А. Сеницын // Механика твердого тела. – 1997. – № 3. – С. 39–46.
- 2 Взаимодействие в системе «пневматическое колесо – рельс» транспортного средства на комбинированном ходу / В. А. Довгяло [и др.] // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 6. – С. 604–612.
- 3 Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. – М. : Физматлит, 2012. – 348 с.

УДК 624.072

НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ СОСТАВНЫХ ПЛИТ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВАНИИ ВИНКЛЕРА

О. В. КОЗУНОВА, В. А. ДУДОРГА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

Строительство дорог с применением цементобетона используется уже более 50 лет и актуально для стран с различными климатическими условиями. Очевидным преимуществом цементобетонных покрытий является меньшее образование колеи, так как структура бетона значительно тверже (прочнее) асфальта. Именно поэтому он в меньшей мере подвержен деформациям от нагрузок, что препятствует образованию колеи. Из недостатков можно выделить повышенный уровень шума, так как асфальтобетон более пористый и пластичный, а следовательно, лучше поглощает шумы.

Расчет составных плит дорожного покрытия на основании Винклера не раскрыт в полной мере. Работы Б. Г. Коренева [1], Г. Я. Попова [2], Р. В. Серебряного [3] знакомят нас с возможными подходами по расчету шарнирно-соединенных плит на упругом основании.

Данная работа предлагает общий подход для расчета шарнирно соединенных плит на основании Винклера, который основан на смешанном методе строительной механики [4] и способе Б. Н. Жемочкина [5], позволяющий рассчитывать составные плиты или балки любой формы на разных моделях упругого основания.

Рассмотрим систему шарнирно-соединенных плит на основании Винклера под действием внешней статической нагрузки, представленной в работе [4] (рисунок 1). Крайние плиты будем считать шарнирно-опертыми с одной стороны на неподвижное основание.

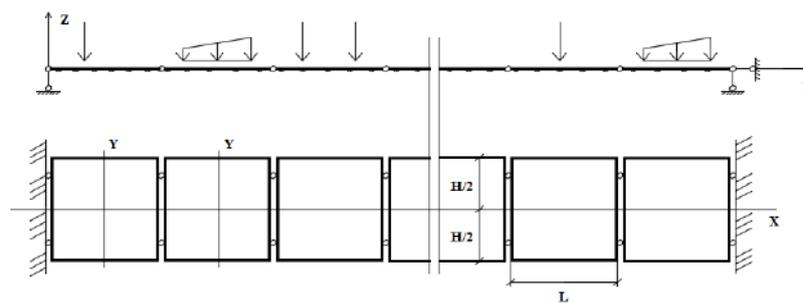


Рисунок 1 – Система шарнирно-соединенных плит

Плиту дорожного покрытия разобьем на равные прямоугольные части с размерами $\Delta x \times \Delta y$, далее в центре каждого участка поставим вертикальную связь, через которую будет осуществляться контакт плиты с основанием. Будем считать, что усилие в связи вызывает равномерную эпюру давлений в пределах участка. Полученную статически неопределимую систему решаем смешанным методом строительной механики [4].

Канонические уравнения смешанного метода при решении поставленной задачи для средней плиты с номером i запишем в виде формулы (1), представленной в работе [5].