

**МЕХАНИКА**

УДК 625.1:626.26

*И. А. ВОРОЖУН, старший преподаватель, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПЛАТФОРМЕ**

Рассмотрена схема крепления четырех труб большого диаметра на железнодорожной платформе с использованием стальных канатов и натяжных устройств, позволяющих создать предварительное натяжение канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор. Методом математического моделирования исследовано влияние предварительного натяжения канатов крепления труб к железнодорожной платформе на величину динамических сил в процессе соударения вагонов. Установлено влияние предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор на величину динамических воздействий как на платформу, так и на вагоны в процессе их соударения. Выполненные расчеты показывают, что увеличение предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор сопровождается снижением динамических сил в канатах продольного крепления труб к платформе.

**Ж**елезнодорожный подвижной состав с размещенными на нём грузами представляет сложную механическую систему, и обеспечение безопасности его движения связано с проведением глубоких и всесторонних исследований. Необходимость повышения скорости движения поездов, а также расширение ассортимента перевозимых грузов требует совершенствования как вагонного парка, так и способов размещения и крепления грузов на подвижном составе.

Многочисленные исследования показывают, что основной причиной, приводящей к разрушению и повреждению как перевозимых грузов, так и самих вагонов, является нарушение режимов эксплуатации подвижного состава при сортировочной работе. Следует ожидать, что в перспективе относительное влияние указанной причины будет возрастать, поскольку наблюдается тенденция отставания совершенствования конструкции поглощающих аппаратов автосцепного оборудования вагонов от изменений требований к ним, обусловленного увеличением массы гружёных вагонов и интенсификацией их использования. Необходимо отметить также дороговизну оснащения вагонного парка достаточным количеством специализированных вагонов или применения в конструкциях существующих вагонов более эффективных поглощающих аппаратов и подвижных хребтовых балок, обеспечивающих надёжность вагонов и сохранность грузов. Всё это указывает на необходимость проведения работ по оснащению существующих вагонов оборудованием, позволяющим уменьшить силовое воздействие как

на вагон, так и на груз путём дополнительного поддрессирования груза относительно вагона в продольном направлении. Следовательно, проведение исследований, позволяющих обосновать возможность и пути снижения повреждаемости грузов и вагонов за счёт применения устройств для размещения и крепления грузов, а также оптимизации их параметров весьма актуально, а решаемые при этом задачи имеют важное прикладное значение для железнодорожного транспорта единой транспортной сети стран СНГ.

Исследование сил, действующих на груз и элементы его крепления на подвижном составе, а также методика определения норм крепления грузов отражены в работе [1]. Однако другие авторы [2] отмечают, что используемые в существующей методике расчета крепления грузов на открытом подвижном составе такие понятия, как удельные продольные и поперечные горизонтальные инерционные силы, а также удельное значение вертикальной инерционной силы на 1 т веса груза не имеют физического смысла. В связи с этим разработка новой методики расчета крепления грузов на вагоне является важной и актуальной прикладной проблемой в отрасли железнодорожного транспорта. Составлены расчётные и математические модели крепления грузов на открытом подвижном составе при маневровых соударениях, учитывающих действия как продольной инерционной силы, так и сочетания продольной и вертикальной инерционных сил [3].

Особенностями перевозки труб большого диаметра на железнодорожном подвижном составе в

соответствии с действующими техническими условиями являются невозможность полного использования грузоподъемности вагонов и применение крепежных реквизитов одноразового пользования. Вопросам размещения и крепления труб на подвижном составе железных дорог посвящен целый ряд работ. Авторы работы [4] пишут, что в связи с принятием Министерством путей сообщения СССР решения о внедрении на сети железных дорог увеличенного и льготного габаритов погрузки возникла необходимость разработки новых схем размещения труб на открытом подвижном составе, а также дальнейшего совершенствования действующих технических условий [5]. Поскольку стальные трубы отличаются большим разнообразием (по наружному диаметру, толщине стенки, длине), авторы предлагают оптимизацию размещения и крепления труб в вагоне осуществлять с применением ЭВМ. В связи с большими объемами перевозок труб для газопроводов в США, например, начинают применять платформы с упругими торцевыми стенками и стойками на продольных брусках [6]. При соударениях вагонов трубы могут сдвигаться вдоль платформы, а упругие стенки воспринимают эти воздействия. Вопросы, связанные с улучшением использования грузоподъемности и вместимости вагонов при перевозке труб, освещены в работе [7]. Авторами предложено устройство для размещения и крепления на железнодорожной платформе пяти труб диаметром 1420 мм. При соударениях вагонов трубы удерживаются от продольного смещения в таком устройстве только силами трения.

Выполненный обзор литературы показал, что перевозку труб диаметром 1420 мм можно осуществлять не только в полувагонах, но и в специализированных вагонах, а также на четырехосных платформах, оборудованных съемными устройствами для размещения и крепления четырех и даже пяти труб указанного диаметра.

В работе [8] исследовалось влияние предварительного натяжения упругих элементов поперечной обвязки на продольное перемещение труб. Предварительное натяжение упругих элементов поперечной обвязки создается натяжными устройствами при погрузке труб на железнодорожную платформу. Однако как при маневровой работе, так и при транспортировании весь штабель труб может сместиться вдоль платформы и создать дополнительное натяжение канатов крепления труб к платформе. Целью работы является установление влияния предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор к железнодорожной платформе на величину динамических сил в процессе соударения вагонов.

Платформа, загруженная трубами, представляет динамическую систему со многими степенями

свободы. В процессе исследования эту сложную систему заменим более простой расчетной схемой с ограниченным числом степеней свободы, но отражающей основные свойства исходной схемы и соответствующей поставленной цели.

В представленной схеме (рисунок 1) четыре трубы диаметром 1420 мм размещены на железнодорожной платформе в два яруса, а реквизиты крепления содержат стальные канаты с натяжными устройствами. Нижний ярус труб уложен на опоры, закрепленные на раме платформы. Между нижним и верхним ярусами труб установлены промежуточные опоры, которые канатами прикреплены к раме платформы, и весь комплект труб посредством канатов поперечной обвязки также прикреплен к раме платформы. От продольного смещения (в направлении движения платформы) трубы обоих ярусов удерживаются канатами, охватывающими блоки натяжных устройств, закрепленные на торцах рамы платформы. Опоры снабжены обрезиненными ложементами для предохранения от повреждений полиэтиленового покрытия труб и повышения коэффициента сухого трения.

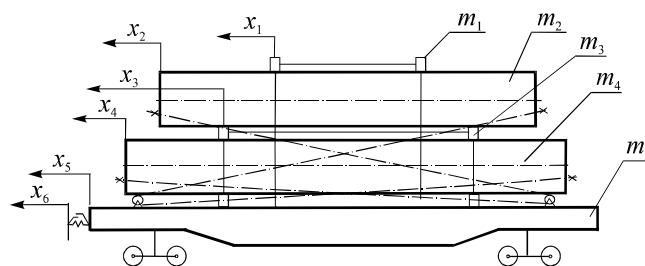


Рисунок 1 – Расчетная схема платформы с трубами

В рассматриваемой математической модели процесса соударения платформы, загруженной двумя ярусами труб, с группой из трех неподвижных вагонов все тела считаются абсолютно твердыми, а элементы продольного крепления труб и поперечной обвязки обладают упругими свойствами и имеют линейные характеристики. Движение механической системы рассматривается в продольной вертикальной плоскости на прямом горизонтальном участке пути.

Изменением углов наклона канатов продольного крепления при смещении труб пренебрегаем. Элементы поперечной обвязки и промежуточные опоры объединены в отдельные блоки с соответствующими массами. Продольные линейные перемещения поперечной обвязки, двух труб верхнего яруса, промежуточных опор, двух труб нижнего яруса, платформы и трех вагонов обозначим через  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$  соответственно. Начало отсчета каждой из координат  $x_i$ , определяющих положение элементов системы, соответствует мо-

менту соприкосновения платформы с вагоном стенки. Таким образом, при принятых допущениях рассматриваемая система будет иметь восемь независимых координат. Применим способ Германа – Даламбера и запишем систему дифференциальных уравнений, отражающих движение ярусов труб, платформы и трех вагонов по представленной расчетной схеме:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + T_1 \sin \alpha_1 - F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + T_2 \cos \alpha_2 + F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) &= 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + T_3 \sin \alpha_3 - F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) &= 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 + T_4 \cos \alpha_4 + F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) &= 0; \\ m_5 \ddot{x}_5 - T_1 \sin \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 - T_3 \sin \alpha_3 - T_4 \cos \alpha_4 - \\ - F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + R_1 &= 0; \\ m_6 \ddot{x}_6 - R_1 + R_2 &= 0; \\ m_7 \ddot{x}_7 - R_2 + R_3 &= 0; \\ m_8 \ddot{x}_8 - R_3 + R_4 &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $m_1, \dots, m_8$  – соответственно массы поперечной обвязки, двух труб верхнего яруса, промежуточных опор, двух труб нижнего яруса, платформы и трех вагонов;  $T_1, \dots, T_4$  – соответственно силы упругости элементов поперечной обвязки, продольного крепления труб верхнего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;  $F_1, \dots, F_4$  – соответственно силы сухого трения между элементами поперечной обвязки и трубами верхнего яруса, трубами верхнего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы;  $\alpha_1, \dots, \alpha_4$  – соответственно углы отклонения элементов поперечной обвязки от вертикали, наклона элементов продольного крепления труб верхнего яруса к горизонту, отклонения элементов крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего яруса к горизонту;  $R_1, \dots, R_4$  – силы в междувагонных связях.

Силы упругости элементов поперечной обвязки, продольного крепления труб верхнего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса определяются выражениями

$$\begin{aligned} T_1 &= c_1 \left( \sqrt{(h_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_5)^2} - h_1 \right); \\ T_2 &= c_2 (x_2 - x_5); \\ T_3 &= c_3 \left( \sqrt{(h_3 + \lambda_3)^2 + (x_3 - x_5)^2} - h_3 \right); \\ T_4 &= c_4 (x_4 - x_5), \end{aligned}$$

где  $c_1, \dots, c_4$  – соответственно коэффициенты жесткости упругих элементов поперечной обвязки, продольного крепления труб верхнего яруса, крепления промежуточных опор и продольного креп-

ления труб нижнего яруса;  $h_1, h_3$  – соответственно длины канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор в свободном (недеформированном) состоянии;  $\lambda_1, \lambda_3$  – соответственно величины предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор.

Силы сухого трения между элементами поперечной обвязки и трубами верхнего яруса, трубами верхнего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы связаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1 (m_1 g + T_1 \cos \alpha_1); \\ F_2 &= f_2 ((m_1 + m_2) g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2); \\ F_3 &= f_3 ((m_1 + m_2 + m_3) g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \cos \alpha_3); \\ F_4 &= f_4 ((m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g + \\ &+ T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \cos \alpha_3 + T_4 \sin \alpha_4), \end{aligned}$$

где  $f_1, \dots, f_4$  – соответственно коэффициенты трения между элементами поперечной обвязки и трубами верхнего яруса, трубами верхнего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Тригонометрические функции углов отклонения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор от вертикали:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \frac{x_1 - x_5}{\sqrt{(h_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_5)^2}}; \\ \cos \alpha_1 &= \frac{h_1 + \lambda_1}{\sqrt{(h_1 + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_5)^2}}; \\ \sin \alpha_3 &= \frac{x_3 - x_5}{\sqrt{(h_3 + \lambda_3)^2 + (x_3 - x_5)^2}}; \\ \cos \alpha_3 &= \frac{h_3 + \lambda_3}{\sqrt{(h_3 + \lambda_3)^2 + (x_3 - x_5)^2}}. \end{aligned}$$

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов, не превышающих ход поглощающих аппаратов [9]:

$$\begin{aligned} R_1 &= c(x_5 - x_6)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6)]; \\ R_2 &= c(x_6 - x_7)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_6 - \dot{x}_7)]; \\ R_3 &= c(x_7 - x_8)[1 + \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8)]; \\ R_4 &= cx_8(1 + \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_8), \end{aligned}$$

где  $c$  – коэффициент жесткости упругих элементов междувагонных связей;  $\mu$  – коэффициент трения в элементах междувагонных связей.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) проводилось для диапазона скоростей соударения вагонов 1–3 м/с при следующих исходных данных:  $m_1 = 10$  кг;  $m_2 = m_4 = 13600$  кг;  $m_3 = 100$  кг;  $m_5 = 21000$  кг;  $m_6 = m_7 = m_8 = 84000$  кг;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $c = 11$  МН/м;  $\alpha_2 = 7^\circ$ ;  $\alpha_4 = 0$ ;  $h_1 + \lambda_1 = 3$  м;  $h_3 + \lambda_3 = 1,4$  м;  $\mu = 0,55$ ;  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 0,35$ ;  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 2$  МН/м.

При этом значения  $\lambda_1, \lambda_3$  принимались одинаковыми и варьировались в пределах 0–0,05 м.

На данном этапе проводилось исследование влияния предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор к железнодорожной платформе на величину динамических сил в канатах продольного крепления труб к платформе при разных скоростях соударения вагонов. Расчеты проводились в среде Mathcad 2001 Professional. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунках 2–3 для скорости соударения вагонов 1,5 м/с. Они показывают, что увеличение предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор сопровождается снижением динамических сил в канатах продольного крепления труб к платформе (см. рисунок 2).

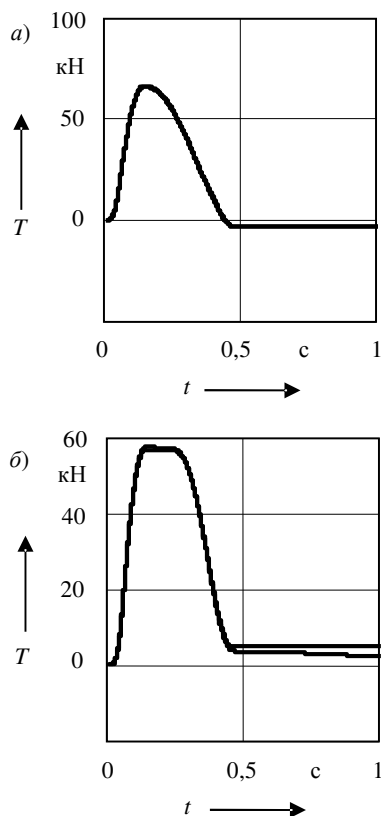


Рисунок 2 – Динамика изменения сил в канатах продольного крепления труб к платформе при предварительном натяжении канатов: а –  $\lambda = 0$ ; б –  $\lambda = 0,02$  м

Из графиков (см. рисунок 3) следует, что дополнительное натяжение канатов поперечной обвязки (кривая 1) и крепления промежуточных опор

(кривая 2), обусловленное смещением пакета труб в направлении движения платформы, сопровождается незначительным увеличением динамических сил в этих канатах.

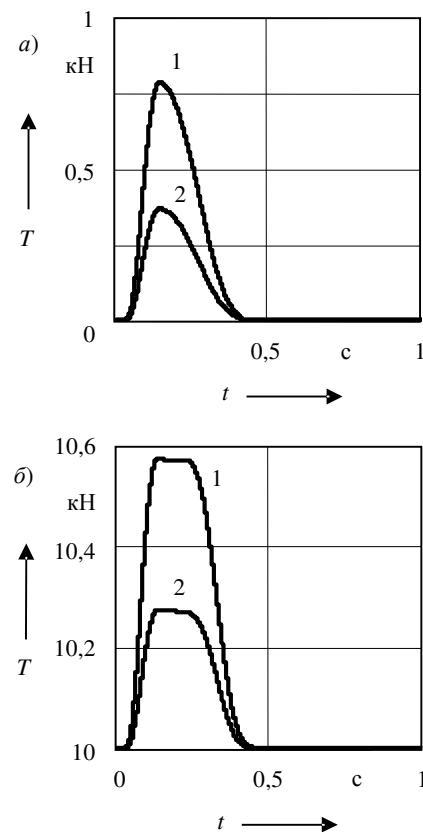


Рисунок 3 – Динамика изменения сил в канатах поперечного крепления труб к платформе при предварительном натяжении канатов: а –  $\lambda = 0$ ; б –  $\lambda = 0,02$  м

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет на стадии проектирования оценить влияние предварительного натяжения канатов поперечной обвязки и крепления промежуточных опор к железнодорожной платформе на величину динамических сил при соударениях вагонов.

#### Список литературы

- 1 Размещение и крепление грузов в вагонах / А. Д. Малов [и др.]. – М., 1980. – 328 с.
- 2 Математическая модель крепления грузов на открытом подвижном составе / М. А. Зачешигрова [и др.] // Восьмой Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике : аннотации докл. – Пермь, 2001. – С. 272.
- 3 Туранов, Х. Т. Моделирование движений закреплённых на вагоне грузов при трении скольжения при их перевозке на открытом подвижном составе / Х. Т. Туранов [и др.] // Вестник СГУПС. – 2000. – Вып. № 3. – С. 119–131.
- 4 Тарлыков, В. И. Использование льготного и увеличенного габаритов погрузки при транспортировке стальных труб на платформах / В. И. Тарлыков, В. А. Трусов // Совершенствование перевозок грузов по железной дороге : межвуз. сб. науч. тр. / НИИЖТ. – Новосибирск, 1985. – С. 90–97.
- 5 Тарлыков, В. И. Совершенствование технических условий размещения и крепления стальных труб и их пакетов в вагоне с помощью ЭВМ / В. И. Тарлыков, Г. М. Каган // Совершенствование перевозок грузов по железной дороге : межвуз. сб. науч. тр. / НИИЖТ. – Новосибирск, 1989. – С. 24–32.

6 Соколов, М. М. Зарубежные вагоны. Особенности конструкции, теории и расчета / М. М. Соколов, Ю. П. Борошенко, А. А. Эстлинг. – Л., 1988. – 60 с.

7 Устройство для крепления штабеля труб на транспортном средстве : а. с. 1638043 СССР, МКИ В 60 Р 7/12 / В. И. Тарлыков [и др.]. – № 4419163 ; заявл. 03.05.88 ; опубл. 30.03.91, Бюл. № 12. – 7 с.

Получено 10.10.2007

**I. A. Vorojun.** Estimation of dynamic forces in elements of fastening of pipes on a railway platform.

In paper the circuit design of fastening of four pipes of the big diameter on the flat-car with use of wire ropes and the tensioning devices surveyed, allowing to create prestressing ropes of a cross binding and fastening of intermediate support. The method of mathematical modelling investigates agency of prestressing of ropes of fastening of pipes to the flat-car on magnitude of dynamic forces during a collision of carriages. Agency of prestressing of ropes of a cross binding and fastening of intermediate support on magnitude of dynamic affectings as on a platform and carriages is established during their collision. The executed calculations show, that the increase in prestressing of ropes of a cross binding and fastening of intermediate support is accompanied by decrease of dynamic forces in ropes of longitudinal fastening pipes to a platform.

8 Шилович, А. В. Динамические воздействия на крепление труб к железнодорожной платформе / А. В. Шилович, А. В. Сементовский, И. А. Ворожун // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 7. – № 1. – С. 25–28.

9 Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

---

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2008. № 1 (16)

---

УДК 539.3

*Е. П. ДОРОВСКАЯ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С УПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

Рассмотрен изгиб упругой прямоугольной трехслойной пластины с жестким наполнителем, покоящейся на упругом основании, как элемента транспортной конструкции. Для описания кинематики несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа. Реакция основания описывается моделью Винклера. На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев. Для получения дифференциальной системы уравнений равновесия использован вариационный принцип Лагранжа. Аналитическое решение выписано в определителях. Его численная апробация проведена с помощью обратной матрицы. Проведен числовой параметрический анализ напряженного состояния материалов слоев в зависимости от жесткости упругого основания.

**К**омпозитные, в том числе слоистые, элементы конструкций широко используются в транспортном машиностроении: в качестве обшивки вагонов, корпусных элементов авиационных аппаратов, космических объектов, строительных панелей и т. д. Трехслойные пластины в условиях деформации изгиба оказываются наиболее рациональными с точки зрения прочности и жесткости. В работах [1–4] исследованы трехслойные элементы конструкций, не связанные с упругим основанием. В статье [5] исследованы перемещения в трехслойной прямоугольной пластине, связанной с упругим основанием. Здесь приводится математическая постановка задачи по определению напряженного состояния подобной пластины, ее аналитическое решение и численный параметрический анализ зависимости напряжений на поверхностях слоев от жесткости упругого основания.

Несимметричная по толщине упругая трех-

слойная прямоугольная пластина с жестким наполнителем покоится на упругом основании. Для описания кинематики пакета приняты гипотезы ломаной нормали: в несущих слоях справедлива гипотеза Кирхгофа, в несжимаемом по толщине наполнителе нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол, составляющий с координатными осями величины  $\psi_x(x, y)$ ,  $\psi_y(x, y)$ . Деформации считаем малыми. Реакция основания  $q_r$  соответствует модели Винклера

$$q_r = -kw, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости основания;  $w$  – прогиб пластины; знак минус указывает на то, что реакция направлена в сторону, противоположную прогибу.

Система координат  $x, y, z$  связывается со срединной плоскостью наполнителя. На пластину действуют внешние распределенные поверхностные нагрузки  $q(x, y)$ ,  $p_x(x, y)$ ,  $p_y(x, y)$  и реакция ос-