УДК 629.735.018.4.027 (045)

А. И. Билеуш, И. М. Плиш

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕСТКИХ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ

В настоящее время в строительстве взлетно-посадочных полос аэродромов широкое применение находит теория плит на упругом основании. Методики расчета аэродромных покрытий основаны на значительных упрощениях, либо реализуемые в них модели слишком далеки от реальной механики процессов взаимодействия бетонных плит и грунтового основания.

Наиболее распространенной моделью является модель Винклера [1]. Ее используют при расчетах балок под нагрузкой, лежащих на грунтовом основании. Недостатком модели является то, что осадка грунта носит не только местный, но и общий характер, а коэффициент постели зависит от размера и формы штампа. Расчет жестких покрытий и их стыковых соединений ведется на статическое воздействие нагрузок от воздушных судов. Динамические эффекты учитываются введением для всего покрытия одного коэффициента (коэффициента динамичности).

Вместе с тем, при посадке воздушного судна и ударе пневматиков шасси о покрытие возникают значительные усилия. Чтобы погасить такие усилия в конструкции любого самолета предусмотрены амортизационные системы (колеса и амортизаторы). Аэродромное покрытие амортизаторов не имеет.

В действительности воздействие самолета на бетонное покрытие при взлете и особенно при посадке является сложным физическим процессом и трудно поддается математическому моделированию. Указанную задачу удается решить лишь при определенных допущениях, правомочность которых может быть обоснована экспериментально.

Прежде всего, будем решать задачу для массы, приложенной к одноколесному шасси, на которое воздействует периодическая сила, имитирующая действие удара, неуравновешенных вращающихся масс (двигатель, вспомогательное оборудование, вибрации при движении по неровностям ВПП). Движение самолета считаем равномерным ($V = const$). ВПП будем моделировать бесконечной упругой балкой – полоской, уложенной на однослойное основание. Механические свойства полосы будем считать постоянными по длине. Принятые допущения являются довольно существенными, однако они необходимы для получения приближенного решения задачи. В дальнейшем от некоторых из них можно будет отказаться за счет усложнения модели.

Рассмотрим случай удара и движения силы по бесконечной балке, лежащей на упругом основании.

Наличие периодической возмущающей силы, действующей на движущийся инерционный груз, может существенно изменить условия движения груза. Во-первых, действие возмущающей силы обуславливает появление силы инерции груза, в результате чего будет влиять на прогиб инерция массы. Во-вторых, в сложном движении груза как составная его часть будет входить вынужденное колебание, следовательно, возможен резонансный режим.

Энергия удара пневматиков шасси самолета состоит из кинетической – $0{,}5\ M_c V_y^2$ и потенциальной энергии $(G - Y)(H_ц + S)$. Переходя к величине усилия на покрытие при ударе одноколесного шасси, имеем

$$P = \frac{0{,}5\ M_c V_y^2 + (G - Y)(H_ц + S)}{(H_ц + S)} \qquad (1)$$

где M_c – масса воздушного судна, приходящаяся на стойку одноколесного шасси;

V_y – вертикальная составляющая скорости при посадке;

G и Y – вес и подъемная сила самолета, приходящиеся на одну опору;

$H_ц$ и S – перемещение центра тяжести самолета за счет работы амортизаторов и вертикального перемещения поверхности плиты покрытия.

Кроме вертикальных усилий при посадке самолета на покрытие действуют горизонтальные силы сопротивления, которые возникают вследствие торможения. При этом величина таких усилий изменяется в зависимости от условий посадки – с нерасскрученными или заторможенными колесами. Дополнительные горизонтальные и вертикальные усилия в покрытии возникают также при накатывании пневматиков на неровности, изменении уклонов покрытия и др. Но в данной постановке такие усилия не учитываются.

Для корректной постановки задачи следовало бы учитывать жесткость протектора и каркаса шин. Но чтобы не усложнять задачу, мы будем допускать, что усилия P действуют на относительно малую площадь, т.е. усилия и деформации будут определяться на некотором расстоянии от контакта.

Прогиб балки в неподвижной системе координат с учетом затухания, вызванного диссипацией энергии, и с учетом касательных напряжений в основании описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$EJ\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \nu\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \mu\frac{\partial y}{\partial t} + cy = 0, \quad (x \neq Vt), \qquad (2)$$

где EJ – изгибная жесткость балки;

ν - коэффициент, учитывающий взаимодействие нормальных и касательных напряжений основания;

ρ - масса единицы длины балки;

μ - коэффициент затухания;

c - коэффициент упругости основания;

V - скорость движения груза;

x - продольная координата, отсчитываемая от точки, где находится груз в момент времени t = 0;

y(x,t) – прогиб балки, вызванный движущимся грузом.

Уравнение (2) справедливо во всех точках балки, кроме точки под грузом ($x \neq Vt$). Нагрузка, приложенная в точке x = Vt, состоит из веса груза, инерционного члена и силы удара.

Усилия P изменяются во времени и зависят от периода удара. Удар делится на два периода: первый – от момента касания пневматиком покрытия до момента наибольшего сближения, второй период – с момента наибольшего сближения до момента отрыва пневматика от покрытия. При этом для упрощения задачи считаем, что величина $H_ц$ значительно больше, чем S и поэтому ею можно пренебречь. Учитывая это, получим

$$P = \frac{0{,}5\ M_c V_y^2}{H_ц} + (G - Y) - M_c \frac{d^2 y}{dt^2}; \qquad (3)$$

Уравнение (2) должно интегрироваться при следующих условиях:

$$y = 0 \text{ при } x \to \pm ?, \qquad (4)$$

$$y_1 = y_2; \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y_2}{\partial x}; \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y_2}{\partial x^2} \qquad (x = Vt), \qquad (5)$$

$$\frac{\partial^3 y_1}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 y_2}{\partial x^3} - \frac{P}{EJ}$$

Здесь y_1 – прогибы балки слева (($x < Vt$), а y_2 - справа от груза ($x > Vt$). Условия (5) обозначают непрерывность прогиба, напряжения и изгибающего момента в точке действия груза, а также скачок перерезывающей силы на величину P.

Решение задачи удобнее искать в подвижной системе координат, связанной с грузом. Введем новую независимую переменную

$$о = x – Vt \qquad (6)$$

Тогда уравнение (2) становится обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$EJy^{IV} + (\rho V^2 - \nu)y^{II} - \mu V y^{I} + cy = 0 \qquad (о \neq 0). \qquad (7)$$

$$y = 0 \text{ при } о \to \underline{+}\ ?, \qquad (8)$$

$$y_1 = y_2;\ y_1' = y_2';\ y_1» = y_2» \qquad (о = 0) \qquad (9)$$

$$y_1'» = y_2'» - \frac{mg}{EJ}$$

Прогиб балки в результате определяется по формулам

$$y_1(о) = e^{\alpha о} [(A_1 + B_1) \cos во + (A_2 - B_2) \sin во] \qquad (о < 0)$$

$$y_2(о) = e^{-\alpha о} [(C_1 + D_1) \cos до + (C_2 - D_2) \sin до] \qquad (о > 0) \qquad (10)$$

прогиб под грузом в этом случае равен

$$y(0) = A_1 + B_1 = C_1 + D_1,$$

где A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1 и D_2 - коэффициенты, характеризующие систему «упругая плита-грунтовое основание-воздушное судно».

Если к движущемуся вдоль балки грузу приложена дополнительно безинерционная периодическая сила, то можно найти амплитуду колебаний балки слева и справа от движущегося груза

$$Y(о) = \begin{cases} [X_1^2(о) + Y_1^2(о)]^{0,5} & о < 0 \\ [X_2^2(о) + Y_2^2(о)]^{0,5} & о > 0 \end{cases} \qquad (11)$$

При этом амплитуда колебаний под грузом

$$Y(0) = [(A_1 + B_1)^2 + (A_2 + B_2)^2]^{0,5}.$$

Эти уравнения были получены в результате теоретических исследований [2]. Они позволили установить факт значительного возрастания прогибов и напряженного состояния балки от воздействия движущегося груза при достижении или критической скорости. Существующими методами расчета жестких аэродромных покрытий такие результаты не могут быть получены.

В дальнейшем планируется проведение исследований в лабораторных и натурных условиях с целью уточнения математической модели работы системы «Грунтовое основание-аэродромная плита-воздушное судно».

Список литературы

1. *Билеуш А.И. и др.* Аэродромы гражданской авиации. – М.: Воздушный транспорт, 1996. – 400 с.

2. Исследование реакции стыковых соединений плит взлетно-посадочной полосы и подстилающего основания на динамические воздействия колес воздушных судов. – Кн.1.: Моделирование работы системы «упругая плита взлетной полосы-грунтовое основание» при воздействии движущейся нагрузки.: (отчет)/Киев.ин-т.инж.гражд.авиации; Рук. *А.И.Билеуш*; Исп. *И.М.Плиш, В.Н.Буйвол, Н.П.Шмаков, С.В.Котлярова*. – Тема № 089-ГА 92. – Киев, 1992. – 25 с.