

Глава 1. ПРОБЛЕМА ВНЕШНИХ СИЛ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ В ИНЕРЦИОННОЙ СРЕДЕ

1.1. Определение нагрузки в инерционной среде.

Формула Лаппо - Морисона

Практически любая по отношению к сооружению среда, изучавшаяся нами ранее, является инерционной, то есть такой, в которой усилия в связях между сооружением и средой определяются через ускорения и скорости движения среды и сооружения.

Действительно, все виды гравитационной среды¹ (собственный вес, вес оборудования и людей, полезная и снеговая нагрузка, боковое давление сыпучей среды) определяются как произведение соответствующей массы на ускорение силы тяжести, которое для земных условий является постоянным ($g = 9.81$ м/с²). И поэтому известные формулы давления на горизонтальную поверхность однородной или слоистой среды зависят от этого ускорения

$$q = g \cdot \rho \cdot h, \quad (1.1)$$

где $\gamma = g \cdot \rho$ – инерционная сила, ρ – масса единицы объема материала или плотность. Сооружение при использовании традиционной методики считается неподвижным и недеформируемым, а нагрузка прикладывается статически – постепенно до конечного значения и остается постоянной бесконечно долго.

Известны также методики для определения нагрузки в движущейся среде¹ (ветровом, водном потоке), в которую входит сопротивления движению, пропорциональные величине скорости относительного движения – v

$$q = c \rho v^2 / 2. \quad (1.2)$$

При любом типе воздействий нагрузка определяется как сумма инерционной и скоростной составляющих, что отражается в формуле Лаппо - Морисона²:

¹ Стоценко А.А., Доценко С.И., Мальков Н.М., Белоконь М.А., Тони Ченз, Серж Рудченко. Курс теории сооружений. Ч 1. Теория сооружений в инженерном деле. Раздел 1. Концепция сил в строительной механике. - Владивосток, 2001.

² Формула Лаппо - Морисона использовалась при определении волновой нагрузки на гидротехнические сооружения, но ее можно использовать для любого другого вида среды (для гравитационной среды, например, $k_m = \rho h$, $d^2 w / dt^2 = g$, $k_v = 0$; для движущейся $k_m = 0$, $k_v = c \rho / 2$, $n=2$).

Впервые в 1947 г. ее предложил Дорофей Дмитриевич Лаппо (1907-1990). Вне России она появилась позже и известна как формула Морисона. Мы же считаем справедливым дать ей имя двух авторов: *Лаппо - Морисона*.

$$q = k_m \frac{d^2 u}{dt^2} + k_v \frac{du}{dt} \quad (1.3)$$

или

$$q = k_m \frac{d^2 u}{dt^2} + k_v \left(\frac{du}{dt} \right)^n \quad (1.4)$$

где $\frac{d^2 u}{dt^2}$ - ускорение движения; $\frac{du}{dt}$ - скорость движения; u - относительное перемещение при движении среды и сооружения; k_m - коэффициент пропорциональности равный сумме массы движущегося тела и сопротивления среды (его называют присоединенной массой); k_v - коэффициент сопротивления движению пропорциональной скорости относительного движения.

Первое слагаемое формулы (1.3) получено из принципа Д'Аламбера, в соответствии с которым инерционная составляющая нагрузки равна произведению ускорения движения на массу и направлена в сторону противоположную движению

$$q_{ин} = -k_m \frac{d^2 u}{dt^2} = -m \cdot \ddot{u}, \quad (1.5)$$

где m - масса сооружения с учетом присоединенной массы, $\ddot{u} = \frac{d^2 u}{dt^2}$ - обозначено ускорение ее движения).

В соответствии с этим принципом инерционная сила (1.5) понимается как внешняя по отношению к сооружению, то есть как нагрузка на него. Поэтому, как и прежде, расчету подвергается невесомое сооружение.

Второе слагаемое формулы (1.3) представляет собой силу сопротивления, направленную также в сторону противоположную движению. Причиной сопротивления является сопротивление среды (например, воздуха, воды), сопротивления соединений, опор и узлов, а также внутреннее сопротивление материала. Наиболее простой и потому широко используемой гипотезой учета внутреннего сопротивления материала сооружения, включая сопротивление соединений и опор, является гипотеза В. Фойхта (Voight W., 1850 - 1919), по которой сила сопротивления принимается пропорциональной скорости движения сооружения относительно среды:

$$q_{вн} = -k_v \frac{du}{dt} = -k_v \dot{u}, \quad (1.6)$$

где $\frac{du}{dt} = \dot{u}$ - скорость движения.

Внешнее сопротивление обычно пропорционально второй степени этой скорости

$$q_{\text{вн}} = -k_v \left(\frac{du}{dt} \right)^2 = -k_v \dot{u}^2. \quad (1.7)$$

Силы сопротивления также являются внешними по отношению к сооружению и позволяют после удаления внешних связей рассчитывать его в пустоте.

Таким образом, нагрузка - усилия в связях между сооружением и инерционной средой - вычисляется по формуле Лаппо-Морисона как сумма сил инерции и сил сопротивления движению.

1.2. Подходы к определению нагрузки в инерционной среде

В том случае, когда ускорение и скорости движущейся среды не изменяются во времени - постоянны, а деформации сооружения малы и ими можно пренебречь, нагрузка с большой степенью достоверности может быть отнесена к статической (*статический* подход).

Пример 1.1. Определить сейсмическую нагрузку на гравитационную подпорную стенку (рис. 1.1) при постоянном горизонтальном ускорении $a = 0.1 g = 0.981 \text{ м/с}^2$. Вес одного метра стенки в направлении, перпендикулярном чертежу, $G = 1250 \text{ кН}$ (масса $m = 125\,000 \text{ кг}$).

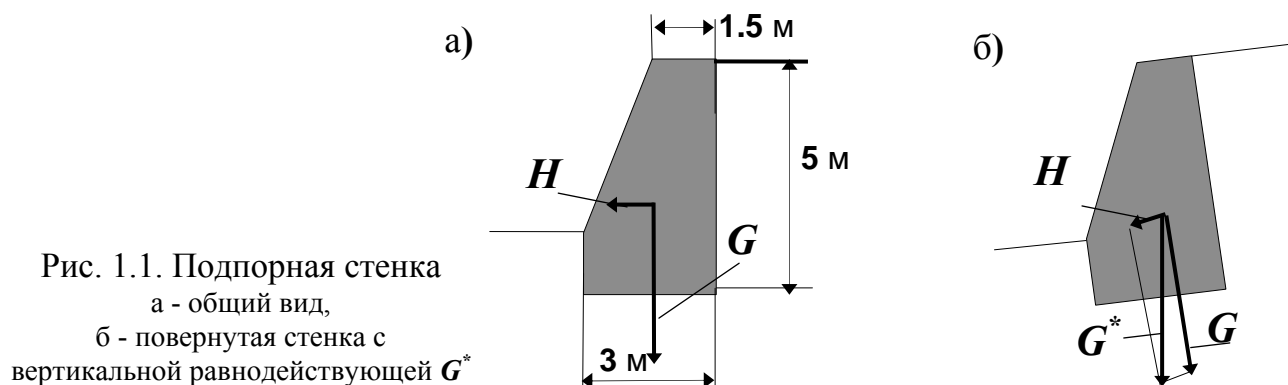


Рис. 1.1. Подпорная стенка

а - общий вид,

б - повернутая стенка с вертикальной равнодействующей G^*

Решение. Ввиду того, что горизонтальное ускорение постоянно, а деформации гравитационной подпорной стенки малы, нагрузку определим как статическую:

$$H = m a = 125000 \cdot 0.981 = 122625 \text{ Н} \approx 123 \text{ кН}.$$

Повернем стенку на угол α от засыпки (в невыгоднейшую сторону)

$$\alpha = \arctg \frac{H}{G} = \arctg \frac{123}{1250} \approx 5.6^\circ,$$

тогда сила, действующая на нее, будет вертикальной. Ее условно можно рассматривать как новый вес стенки:

$$G^* = \sqrt{G^2 + H^2} = \sqrt{1250^2 + 123^2} = 1256 \text{ кН.}$$

Аналогично можно повернуть и засыпку. Это позволяет рассчитывать стенку в новом положении по обычной традиционной методике расчета подпорных стен при увеличенном удельном весе засыпки с учетом изменения угла внутреннего трения и коэффициента сцепления в засыпке при сейсмическом воздействии.

Если сооружение гибкое или очень гибкое и (или) ускорения и скорости среды зависят от времени (не постоянны), то нагрузка прикладывается динамически (зависит от динамических характеристик сооружения и среды).

Ввиду тесной связи при динамическом воздействии нагрузки и напряженно-деформированного состояния сооружения проблемы внешних и внутренних сил неразделимы. В практике расчетов для разделения этих проблем при определении нагрузки используются упрощающие допущения главным образом связанные с упрощением расчетных схем, или, как говорят, с *построением динамической расчетной схемы*. Например, высотные здания заменяются консольным стержнем с массой, сосредоточенной в уровне перекрытий, а одноэтажные здания заменяются консолью с одной массой в уровне покрытия. Мы ограничимся в дальнейшем динамическим расчетом точечных сооружений консольного типа.

Динамические характеристики этих упрощенных схем используются для определения нагрузки (решения проблемы внешних сил), которая затем прикладывается к более сложной расчетной схеме и проблема внутренних усилий и оценки прочности решается при известной нагрузке по традиционной схеме. Такой подход называют *полудинамическим или квазистатическим*. Ниже при определении нагрузки от землетрясений и ветра мы будем рассматривать именно такой подход к определению нагрузки.

Поэтому во второй главе рассмотрим методику получения динамических характеристик точечных сооружений консольного типа и приведение рамных сооружений к консольным.