

Инж. Е. В. ШИРОЧЕНКО

629.4.015

Применение теории продольного удара стержней
к исследованию усилий, возникающих
в упряжных приборах поезда при маневрах

А в т о р е ф е р а т

1949

Вопрос о динамических усилиях, возникающих в упряжных приборах поезда имеет весьма существенное значение при решении многих проблем железнодорожного транспорта. Уменьшение непроизводительного веса подвижного состава, выбор рационального типа ударно-тягового прибора, проектирование продольного профиля железных дорог, безопасного в отношении разрыва поездов, далеко не полный перечень таких проблем.

Отсутствие надежных теоретических и экспериментальных исследований этого вопроса побуждало советских конструкторов, при выборе расчетных продольных усилий действующих на единицы подвижного состава, пользоваться необоснованными, завышенными американскими нормами.

В настоящее время, трудами отечественных ученых, исследование неустановившихся режимов движения поезда значительно продвинуто вперед (особенно, применительно к однородным поездам).

Еще в 1919 году великий русский ученый Николай Егорович Жуковский исследовал динамические усилия, возникающие в упряжных приборах поезда при трогании с места и во время движения по ломанному профилю.

Для разрезной упряжи Н. Е. Жуковский рассматривает поезд как упругую нить (стержень) с грузом на одном из концов (локомотивом). Выбор такой расчетной схемы позволяет воспользоваться, при решении поставленных задач, методами прикладной теории упругости.

Анализ явления, проведенный Н. Е. Жуковским, впервые обнаружил волнообразный характер движения системы.

Н. Е. Жуковский, в своем исследовании неустановившихся режимов движения поезда, ограничился в своих работах решением небольшого числа задач этого типа.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ЗНА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В. Лазаряка

1091a

Работы Н. Е. Жуковского получили дальнейшее развитие в трудах проф. В. А. Лазаряна. В ряде теоретических работ проф. Лазарян рассмотрел вопросы о динамических усилиях в упряжных приборах поездов при трогании с места в случаях монотонного и немонотонного увеличения силы тяги, в случае изменения силы тяги, кратковременного действия сил на поезд, при трогании с места после предварительного осаживания и в случае торможения. В этих исследованиях особое внимание было уделено определению верхних границ действующих усилий. В качестве расчетной схемы поезда была принята схема, предложенная проф. Н. Е. Жуковским.

Наряду с теоретическими исследованиями, были проведены большие экспериментальные работы. Данные более восьмисот опытов по измерению усилий, проведенных в натуре, т. е. в поездах, хорошо подтвердили результаты теоретических исследований, а следовательно и правильность расчетной схемы Жуковского.

В 1948 году результаты работ были доложены на механической секции Академии Наук СССР и в Научно-техническом Совете МПС.

Министр Путей Сообщения в приказе за № М-4245/ЦЗ от 8 октября 1948 г. дал следующую директиву составителям новых норм.

При разработке норм на проектирование пассажирских вагонов использовать результаты работ профессора Лазаряна В. А. в области установления продольных усилий, действующих на подвижной состав.

« Научно-техническому Совету Министерства Путей Сообщения при рассмотрении и утверждении норм учесть работу т. Лазаряна ».

Настоящая работа выполнена в соответствии с общим планом проф. В. А. Лазаряна. В ней определяются динамические усилия, возникающие в упряжных приборах однородных и неоднородных поездов при маневрах.

Для однородного поезда рассмотрены следующие случаи:

1. Подход с постоянной скоростью отцепы к составу при маневрах на сортировочных горках;
2. Подход с постоянной скоростью локомотива к составу или поезду;
3. Подход локомотива к составу или поезду с переменной скоростью;
4. Подход с постоянной скоростью локомотива с группой вагонов к составу или поезду. Принято, что все ва-

гоны соединены автосцепкой с обычными пружинно-фрикционными аппаратами.

Во всех задачах отыскиваются верхние границы усилий и, поэтому, сопротивления колебаниям при относительных перемещениях вагонов во внимание не принимаются.

Поезд рассматривается как упругий стержень, что позволяет при исследовании распространения волн удара в поезде, воспользоваться теорией продольного удара стержней. Если принять за начало отсчета времени, момент соударения экипажей и иметь в виду, что после удара соударившиеся сцепы вагонов (или локомотивов и сцеп вагонов) движутся не отделяясь друг от друга, то задача удара становится эквивалентной задаче о продольных колебаниях стержня.

Исследование вопроса сводится к решению волнового уравнения при определенных граничных и начальных условиях. Решение получено в замкнутой форме.

Наиболее сложным этапом получения решения волнового уравнения в замкнутой форме является продолжение этого решения за пределы интервала $(0, l)$. В работе это осуществляется не совсем обычным способом.

В случае отсутствия начальных смещений сечений стержня (это имеет место во всех рассматриваемых в работе задачах) продолжение решения волнового уравнения сводится к продолжению функции возмущения (точнее, функции начальных импульсов) за пределы интервала $(0, l)$. Эта операция с физической точки зрения представляет собой определение такого начального возмущения бесконечного стержня, при котором его участок $(0, l)$ будет двигаться также, как движется ограниченный стержень.

Начальные возмущения бесконечного стержня можно представить как результат наложения ряда отдельных возмущений, подобранных так, что одна из функций представляет собой волну, вызванную начальным возмущением заданного ограниченного стержня, остальные функции суть волны отражения от концов ограниченного стержня.

Каждую из этих функций удобно отнести к отдельной системе координат, выбранных следующим образом:

а) начало координат, к которым отнесена данная функция, помещаем в той точке, начиная с которой эта функция имеет значения, отличные от нуля;

б) положительное направление оси абсцисс выбираем так, чтобы все значения функции, не равные нулю, соответствовали положительным значениям аргумента.

Во всех случаях за исключением одного (удар по стержню стержня с грузом) функции определены, при положительных значениях аргумента, одним аналитическим выражением (при отрицательных значениях аргумента, значения функций—ноль).

Если расположить функции в такой последовательности, в какой происходит отражение волн удара, то вид каждой последующей функции зависит исключительно от вида предыдущей. Характер этой зависимости определяется граничными условиями задачи. Первая функция последовательности определяется из начальных условий задачи.

Исходя из изложенных соображений разработан графоаналитический прием определения возмущений бесконечного стержня, после чего определение любых характеристик движения участка (0,1) является сравнительно простой задачей.

Для однородного поезда получены следующие формулы для определения верхних границ усилий, возникающих в упряжных приборах:

1. Подход с постоянной скоростью V отцепки к составу при маневрах на сортировочных горках.

$$T_{\text{макс}} = \frac{\kappa V}{2a}$$

где κ —„жесткость поезда“, a — скорость распространения упругой волны вдоль поезда

$$\kappa = \frac{w l_B}{2s} \qquad a = \sqrt{\frac{w \cdot l_B \cdot g}{2 \cdot s \cdot q}}$$

В последних двух формулах приняты следующие обозначения:

w —сила, сжимающая до отказа упряжный аппарат.

s —ход упряжного аппарата.

l_B —длина одного вагона.

q —нагрузка на один пог. метр пути от вагонов.

Усилие $T_{\text{макс}}$ будет верхней границей динамического усилия для каждого из упряжных приборов соударившихся сцепов вагонов.

2. Подход с постоянной скоростью V локомотива к составу.

В момент подхода локомотива к составу в головном упряжном аппарате возникает сжимающее усилие

$$T = \frac{\kappa V}{a}$$

Это усилие пробегает со скоростью a по всей длине поезда и, отразившись на свободном конце, возвращается к головному сечению, изменив знак на обратный.

При отражении от локомотива (через промежуток времени, равный $\frac{2l}{a}$, где l —длина состава) это усилие удваивается, т. е.

$$T_{\max} = \frac{2\kappa V}{a}$$

3. Подход с постоянной скоростью V локомотива к поезду.

В момент подхода локомотива к поезду в ударяемом упряжном аппарате возникает усилие, равное

$$T = \frac{\kappa V}{a}$$

Это усилие пробегает по всей длине поезда и, отразившись у головного локомотива в момент $t = \frac{l}{a}$, достигает величины

$$T_{\max} = \frac{2\kappa V}{a}$$

4. Подход локомотива к составу или поезду с переменной скоростью

$$\text{подход к составу } T_{\max} = \frac{2\kappa V}{a} - F$$

$$\text{подход к поезду } T_{\max} = \frac{2\kappa V}{a} + F$$

где V и F —соответственно скорость и сила тяги локомотива в начале удара (вектор скорости и вектор силы предполагаем направленными в одну сторону).

Возникают эти усилия в тех же сечениях и в те же моменты времени, что и при подходе локомотива с постоянной скоростью.

5. Подход с постоянной скоростью V локомотива с группой вагонов к составу.

Если обозначить через l длину состава после сцепления головной части с подводимой группой вагонов, а длину подводимой группы вагонов через μl , то в момент соударения, усилие в ударяемом упряжном приборе будет

$$T = \frac{\kappa V}{a}$$

В момент $t = \frac{2l}{a}$ усилие в ударяемом упряжном приборе будет

$$T_{\max} = \frac{3}{2} \frac{\kappa V}{a}$$

Если $\mu l \geq \frac{0,35}{\alpha}$ (α — отношение веса единицы длины поезда к весу локомотива), то это усилие будет верхней границей. В противном случае T_{\max} будет находиться между значениями: $\frac{2\kappa V}{a}$ и $\frac{3}{2} \frac{\kappa V}{a}$

6. Подход с постоянной скоростью V локомотива с группой вагонов к поезду.

В этом случае величины усилий будут те же, что и в предыдущем. Усилие

$$T_{\max} = \frac{3}{2} \frac{\kappa V}{a}$$

возникнет только не в момент $t = \frac{2l}{a}$, а в момент $t = \frac{l}{a}$, в упряжном аппарате, находящемся от головы локомотива в расстоянии, равном длине подаваемой группы вагонов.

Во второй главе работы определяются динамические усилия, возникающие в упряжных аппаратах поезда, составленного из разнотипных вагонов (либо же однотипных, но различно нагруженных).

Предполагается, что однотипные и одинаково нагруженные вагоны поставлены в поезд группами, т. е., что поезд по длине разделяется на участки, в пределах которых нагрузка на погонный метр пути и жесткость поезда постоянны.

Поезд принимается за упругий стержень с грузом на том конце, где по условию задачи находится локомотив. Соответственно тому, как размещены вагоны в поезде, стержень предполагаем состоящим из отдельных участков, отличающихся либо жесткостью, либо погонной массой, либо тем и другим. В пределах каждого из участков погонная масса и жесткость приняты постоянными.

В этом случае величина максимального усилия зависит от числа участков поезда, отличающихся погонной массой и жесткостью, соотношения масс и жесткостей участков, характера чередования этих участков и их протяженности.

В связи с этим в работе основное внимание уделено

разработке приёма, позволяющего сравнительно просто получать графики изменения во времени усилий, возникающих в любом сечении неоднородного поезда, для конкретных задач соударения вагонов и подхода локомотива к составу или поезду.

Соображения, на которых основан этот приём поясним на примере стержня, состоящего из двух участков $(0, l_1)$ и $(l_1, l_1 + l_2)$, отличающихся погонной массой и жесткостью. Что же касается условий по концам, то они могут быть любыми.

Возьмем два бесконечных стержня — стержень № 1 и стержень № 2. Каждому из этих стержней сообщаем начальные возмущения, удовлетворяющие следующим условиям.

Стержень № 1.

а) начальными возмущениями участка $(0, l_1)$ бесконечного стержня должны быть начальные возмущения I участка ограниченного стержня;

б) для сечения $x=0$ бесконечного стержня должно выполняться условие, являющееся граничным условием левого конца ограниченного стержня.

Стержень № 2.

а) начальными возмущениями участка $(l_1, l_1 + l_2)$ бесконечного стержня должны быть начальные возмущения II участка ограниченного стержня;

б) для сечения $x=l_1 + l_2$ бесконечного стержня должно выполняться условие, являющееся граничным условием правого конца ограниченного стержня.

Кроме этого для стержней № 1 и № 2, для сечения $x=l_1$ должны выполняться условия, являющиеся следствием того, что участки I и II в процессе колебаний не отделяются друг от друга.

Если для бесконечных стержней № 1 и № 2 будут подобраны начальные возмущения, удовлетворяющие изложенным требованиям, то участок $(0, l_1)$ стержня № 1 будет двигаться так же, как движется участок I ограниченного стержня, а участок $(l_1, l_1 + l_2)$ стержня № 2 будет двигаться так же, как движется участок II ограниченного стержня.

Начальные возмущения стержня № 1 за пределами участка $(0, l_1)$, а также стержня № 2 за пределами участка $(l_1, l_1 + l_2)$ можно представить, как результат наложения ряда отдельных возмущений, подобранных таким образом, что изображающие их функции обладают следующими свойствами:

а) если каждую из этих функций отнесем к отдельной системе координат, выбранных так, что функция имеет значения, отличные от нуля, только при положительных значениях аргумента, то она будет определена в интервале $(0, \infty)$ одним аналитическим выражением;

б) если построить характеристики волновых уравнений для участков $(0, l_1)$ и (l_1, l_1+l_2) ограниченного стержня, то каждой из этих характеристик соответствует, определенным образом, одна из разыскиваемых функций. Аналитические выражения функций определяются в такой последовательности, в какой характеристики функций следуют на чертеже друг за другом;

в) первая функция такой последовательности определяется, исходя из начальных условий задачи. Вид каждой последующей функции зависит исключительно от вида предыдущей функции и определяется с помощью продолжающего уравнения, выведенного из соответствующего граничного условия задачи;

г) вид продолжающих уравнений и, что особенно существенно, их использование значительно упрощается, если для стержней № 1 и № 2 принять различные масштабы длин, подобранные так, что величины $a_1 t$ для стержня № 1 и $a_2 t$ для стержня № 2, при одном и том же t , изображаются одинаковыми отрезками прямой.

Для однородного и для неоднородного поезда рассмотрен ряд конкретных примеров. Построены графики изменения во времени усилий, возникающих в различных сечениях поезда.