

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА, В СОСТАВ КОТОРОГО ВКЛЮЧЕН СЦЕП ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН

Неоднородность грузового поезда по массе и виду перевозимого груза приводит к росту продольных усилий, возникающих в межвагонных соединениях в процессе его движения. При этом наличие вагонов-цистерн в составе поезда из-за подвижности транспортируемого в них жидкого груза может оказывать значительное влияние на динамическую нагруженность конструкций экипажей состава. Целью работы являлось исследование динамических процессов, протекающих в неоднородном грузовом поезде, в состав которого включены вагоны-цистерны, при таких режимах движения, как торможение, пуск в ход и движение "на выбеге" по характерным переломам продольного профиля пути. Дана оценка влияния месторасположения сцепа вагонов-цистерн в составе грузового поезда и уровня недолива жидким грузом котлов цистерн на динамическую нагруженность конструкций вагонов при переходных режимах движения. Показано, что для повышения уровня безопасной транспортировки экологически опасных грузов сцеп из вагонов-цистерн лучше располагать в первой половине состава так, чтобы было прикрытие его сцепом сухозрузных вагонов, расположенным непосредственно за локомотивом. Сцеп вагонов-цистерн, котлы которых порожние, целесообразно располагать в хвостовой части поезда.

Неоднорідність вантажного поїзда за масою та видом вантажу, що перевозиться, призводить до зростання поздовжніх зусиль, що виникають в міжвагонних з'єднаннях в процесі його руху. При цьому наявність вагонів-цистерн в складі поїзда із-за рухомості рідкого вантажу, що в них транспортується, може значно впливати на динамічну навантаженість конструкцій екіпажів рухомого складу. Метою роботи є дослідження процесів, що виникають в неоднорідному вантажному поїзді, до складу якого включено вагони-цистерни, при таких перехідних режимах руху, як гальмування, рушення поїзда з місця та рух "на вибігу" по характерних переломах поздовжнього профілю колії. Наведено оцінку впливу місця розташування зчепи вагонів-цистерн в складі вантажного поїзда та рівня недоливу рідким вантажем котлів цистерн на динамічну навантаженість конструкцій вагонів при перехідних режимах руху. Показано, що для підвищення рівня безпеки транспортування екологічно небезпечних вантажів зчеп із вагонів-цистерн краще розташовувати в першій половині поїзда так, щоб було прикриття його зчепом суховантажних вагонів, які знаходяться безпосередньо за локомотивом. Зчеп вагонів-цистерн, котли яких порожні, доцільно розташовувати в хвостовій частині поїзда.

Non-uniform masses and cargo of the freight car result in increased longitudinal forces in intercar connections in its motion. The presence of tank cars in a train can influence significantly on dynamic loading the vehicle structures due to the fluidity of cargo. The work aim is to study dynamic processes in a non-uniform freight car with tank cars in braking, starting and overtraveling with a distinctive change of a longitudinal gradient. The effects of location of coupling the tank cars in the freight train and a level of incomplete filling a liquid cargo in tank cars on dynamic loading the car structures in a transient motion are estimated. It is shown that coupling the tank cars is best suited for locating at the first half of a train to increase a level of a safe transportation of ecologically dangerous cargo. Thus, the train is protected by coupling the bulk- cargo cars located directly behind the locomotive. Coupling the empty tank cars is best suited for locating at the trail end of a train.

Введение. Грузовые составы, как правило, формируются из вагонов различного типа вне зависимости от их осности, вида и характера транспортируемого груза. По сравнению с поездами, состоящими из однотипных вагонов, неоднородность состава по массе и виду перевозимого груза приводит при переходных режимах движения поезда к росту продольных усилий в его межвагонных соединениях [1 – 4]. Уровень динамических нагрузок оказывает существенное влияние на безопасность движения вагонов в составе поезда. Значительные объемы перевозок по железным дорогам нефти, нефтепродуктов, сжиженных газов, кислот, щелочей и т. д. определяют повышенные требования к конструкции подвижного состава, транспортирующего жидкие грузы. При этом значительную роль играют специализированные вагоны-цистерны, обеспечивающие не только максимальную грузоподъемность, но также сохранность грузов при транспортировке и минимальные потери в аварийных ситуациях. В отличие от других типов вагонов, нагруженность элементов конструкций вагонов-цистерн при эксплуатационных воздействиях во многом зависит от поведения жидкого груза, имеющего свободную поверх-

ность. Уровни эксплуатационных недоливов котлов цистерн для различных жидкостей, обусловленные специфическими свойствами грузов и техническими требованиями их транспортировки, находятся, как правило, в диапазоне (0,1 – 0,5) радиуса емкости, что при эксплуатационных воздействиях приводит к движению жидкой среды и появлению в ряде случаев значительных нагрузок на несущие элементы конструкции. Кроме того, колебания жидкого груза в котлах вагонов-цистерн, находящихся в составе поезда, оказывают влияние на формирование динамических усилий, возникающих в межвагонных соединениях поезда в целом при его нестационарных режимах движения.

Постановка задачи. Методы решения. Рассмотрим грузовой поезд, составленный из локомотива ВЛ-80, 43 четырехосных вагонов разной степени загрузки и 15 вагонов-цистерн модели 15-1547. Автосцепные устройства железнодорожных экипажей оборудованы пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами. Масса поезда составляет порядка 5000 т. Такое формирование состава имело место в реальности при эксплуатации поезда на Львовской железной дороге.

При моделировании динамики поезда использован комбинированный подход, при котором часть экипажей представляется упрощенными расчетными схемами, а отдельные вагоны – более сложными, учитывающими специфику конструкции и особенности транспортируемого груза.

Поезд рассматривается как цепочка твердых тел, соединенных нелинейными элементами, учитывающими зазоры в межвагонных соединениях. В качестве расчетных схем сухогрузных вагонов использованы одномерные расчетные схемы [5]. Вагоны-цистерны представлены плоскими расчетными схемами в виде эквивалентного твердого тела с математическими маятниками, моделирующими колебания свободной поверхности жидкости котла вагона-цистерны в продольно-вертикальной плоскости [2], и двух тележек. Математическая модель движения такого неоднородного поезда описана в работах [2, 4].

Исследуются динамические процессы, протекающие в неоднородном грузовом поезде, в состав которого включены вагоны-цистерны, при таких режимах движения, как торможение, пуск в ход и движение “на выбеге” по характерным переломам продольного профиля пути, и оценивается влияние месторасположения в составе поезда сцепы из вагонов-цистерн и уровня недолива котлов цистерн жидким грузом на динамическую нагруженность конструкций вагонов поезда при переходных режимах движения.

В целях определения наиболее неблагоприятного случая динамической нагруженности вагонов неоднородного поезда при торможении и движении по переломам продольного профиля пути рассматривается предварительно растянутый поезд (зазоры в межвагонных соединениях составляют 65 мм) и предварительно сжатый при пуске в ход (зазоры в межвагонных соединениях равны нулю).

Предполагаем, что сцеп из 15 вагонов-цистерн может быть расположен непосредственно за локомотивом (схема 1), за 8-м (схема 2), 22-м (схема 3) и 43-м (схема 4) вагонами поезда.

Исследуются случаи, когда котлы вагонов-цистерн сцепы заполнены жидким грузом со стандартным уровнем недолива, составляющим 3 %, с недоливом, равным 40 %, а также, когда котлы порожние (100 % уровень недо-

лива). Параметры вагона-цистерны, используемые для расчетов, приведены в табл. 1 [2].

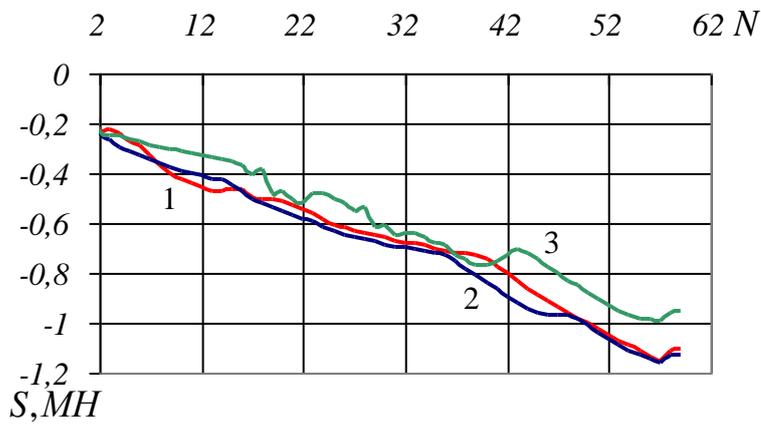
Предполагаем, что локомотив и вагоны оборудованы соответственно чугунными и композиционными колодками. Вагоны оснащены воздухораспределителями № 483 [6, 7]. Для оценки наибольших продольных усилий, возникающих в режиме торможения, рассмотрено экстренное торможение поезда со скорости 10 км/ч при работе воздухораспределителей на максимальном режиме, что соответствует силе нажатия тормозных колодок на ось груженого вагона 42,5 кН. Для порожних как сухогрузных вагонов, так и вагонов-цистерн сила нажатия тормозных колодок на ось составляет 17,2 кН.

Таблица 1

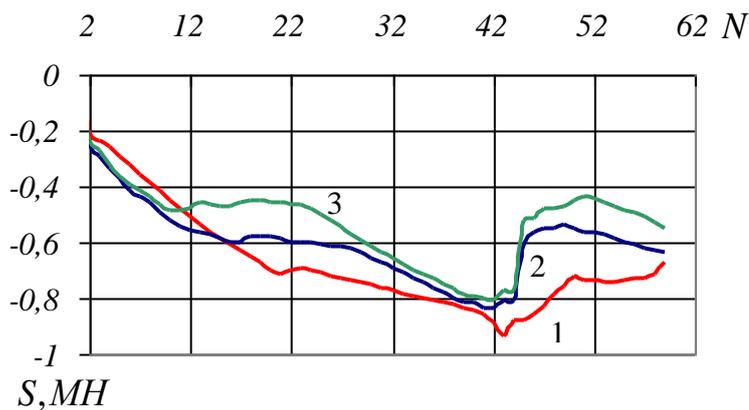
Наименование параметра	Значение параметра	
	3 % недолив жидкого груза	40 % недолив жидкого груза
Масса эквивалентного твердого тела, т	43,693	29,117
Масса маятника, т	40,675	30,472
Момент инерции эквивалентного твердого тела, т·м ²	1200,360	824,930
Момент инерции маятника, т·м ²	387,100	1969,100
Координата точки подвеса маятника, м	4,160	9,138
Длина подвеса маятника, м	3,085	8,039
Высота центра тяжести эквивалентного твердого тела, м	3,628	3,153
Метацентр, м	3,885	6,214
Частота колебаний жидкости, Гц	0,284	0,176
Масса жидкого груза, т	65,000	40,221
Момент инерции жидкого груза, т·м ²	1551,400	3016,600
Момент инерции котла, т·м ²	353,000	353,000
База вагона, м	7,800	7,800

Анализ результатов. На рис. 1 показаны графики распределения максимальных сжимающих усилий по длине поезда при его экстренном торможении и расположении сцепа вагонов-цистерн непосредственно за локомотивом (рис. 1,а) и в хвостовой части состава (рис. 1,б). Линии 1, 2, 3 соответствуют случаям, когда уровни недолива жидким грузом котлов цистерн составляли 3 %, 40 % и 100 %. Максимальные значения усилий, возникающих в межвагонных соединениях сцепа, состоящего из 15 вагонов-цистерн, при разных уровнях недолива котлов жидким грузом и для указанных выше схем формирования состава, приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что усилия в межвагонных соединениях вагонов-цистерн, котлы которых заполнены жидким грузом с 3 % и 40 % недоливами, возрастают при расположении сцепа во второй половине состава.



а)



б)

Рис. 1

Так, если сцеп из цистерн расположен в первой половине поезда, то максимальные сжимающие усилия, действующие на конструкции вагонов-цистерн для схем формирования 1 и 2, составляют порядка 470 и 586 кН при 3 % уровне недолива, 476 и 721 кН при 40 % уровне недолива, 368 и 560 кН при 100 % уровне недолива. При расположении сцепа вагонов-цистерн во второй половине состава – соответственно 793 и 858 кН, 820 и 864 кН, 800 и 553 кН.

Отметим, что в случае заполнения котлов жидким грузом с 40 % недоливом или порожних котлов наихудшей из рассмотренных схем формирования, с точки зрения возникающих наибольших значений сжимающих усилий в межвагонных соединениях сцепа, является схема 3, согласно которой частично загруженные или порожние вагоны-цистерны расположены между большими группами сухогрузных вагонов. С целью повышения безопасности транспортировки экологически опасных грузов сцепы вагонов-цистерн, котлы которых заполнены жидким грузом с 3 % или 40 % уровнями недолива, лучше располагать в первой половине состава.

Таблица 2

Номер вагона-цистерны в сцепе ($i = 1, 15$)	Схемы формирования грузового поезда, в составе которого включен сцеп из вагонов-цистерн											
	Схема 1			Схема 2			Схема 3			Схема 4		
	Уровни недоливов, %			Уровни недоливов, %			Уровни недоливов, %			Уровни недоливов, %		
	3	40	100	3	40	100	3	40	100	3	40	100
	Максимальные значения сжимающих усилий в межвагонных соединениях сцепа вагонов-цистерн при экстренном торможении, кН											
1	224	234	231	387	460	467	554	742	731	881	608	524
2	228	261	245	417	465	476	579	761	742	858	864	515
3	243	293	249	451	468	483	602	772	750	827	550	476
4	272	313	262	487	475	493	621	787	758	788	552	476
5	291	331	272	520	497	501	638	795	764	754	536	470
6	329	346	285	549	521	509	655	806	771	719	551	453
7	367	364	296	569	544	516	667	813	779	736	562	435
8	398	379	304	581	569	521	682	816	784	733	564	443
9	422	392	309	586	593	526	696	820	791	741	571	458
10	444	399	318	584	614	534	708	817	799	743	587	473
11	458	410	324	574	635	540	720	808	802	737	598	483
12	468	421	334	559	654	545	730	799	802	731	611	490
13	470	427	344	544	675	550	743	789	800	725	622	507
14	467	451	354	530	698	555	772	779	799	717	629	530
15	462	476	368	521	721	560	793	769	800	670	634	553

Анализ аварийных лобовых столкновений поезда с препятствием на переезде или с транспортным средством на железнодорожном пути (вагоном, маневровым локомотивом и т. п.) показал, что, как правило, из-за высокого уровня сжимающих продольных сил сходят с рельсов с последующим возможным опрокидыванием вагоны, расположенные непосредственно за локомотивом. Поэтому вагоны-цистерны должны находиться в первой половине состава, но располагаться так, чтобы было прикрытие из сцепа грузовых вагонов, который следует за локомотивом (например, схема 2).

Оценим динамическую нагруженность вагонов при таком переходном режиме движения, как пуск в ход. При этом сила тяги изменяется по экспоненциальному закону и ее максимальное значение составляет 0,4 МН, время нарастания силы тяги от нуля до максимального значения составляет 10 – 15 с. Рассмотрены те же схемы формирования поезда, что и в случае исследования экстренного торможения. На рис. 2 приведены графики распределения вдоль поезда значений максимальных растягивающих усилий, возникающих в межвагонных соединениях при пуске в ход сжатого состава, при расположении сцепа из вагонов-цистерн в голове (рис. 2,а) и в хвостовой части состава (рис. 2,б). Обозначение линий на рис. 2 аналогично обозначению линий на рис. 1.

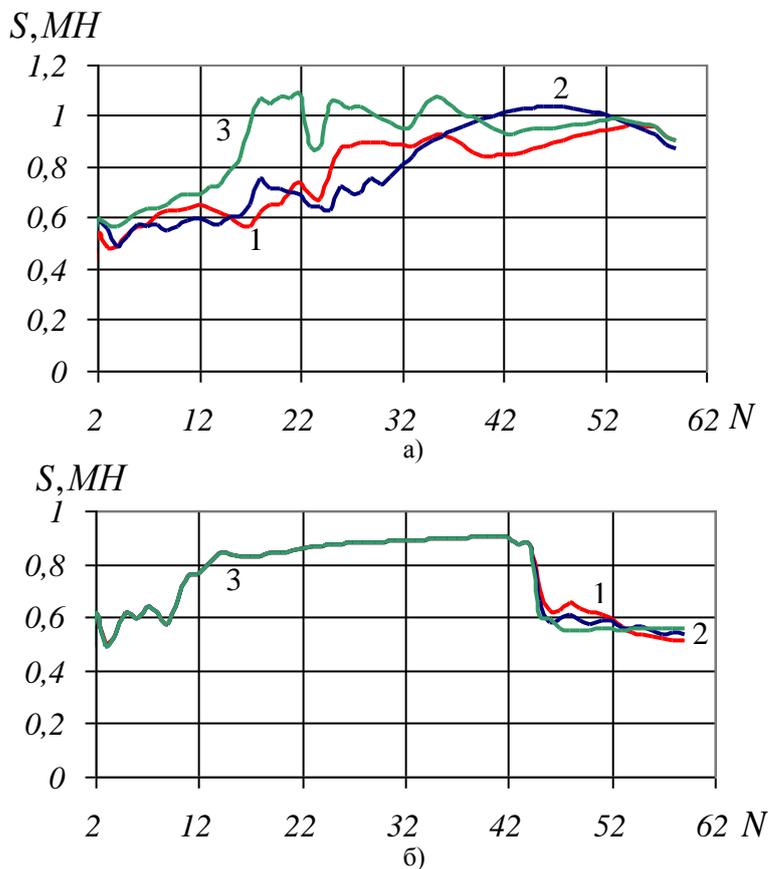


Рис. 2

Анализ результатов, полученных при трогании поезда с места, показал, что значения максимальных растягивающих продольных усилий в междвагонных соединениях цистерн при уровнях недолива в котлах, составляющих 3 % и 40 %, незначительно зависят от месторасположения сцепа вагонов-цистерн в составе поезда. Однако значения усилий несколько возрастают, если вагоны-цистерны расположены во второй половине поезда. Поэтому с точки зрения минимальной нагруженности конструкций вагонов-цистерн целесообразно располагать их в первой половине сухогрузного поезда.

Таким образом, как при экстренном торможении, так и при трогании состава месторасположение сцепа вагонов-цистерн в составе поезда оказывает существенное влияние как на характер распределения максимальных усилий по длине поезда, так и на их значения.

Рассмотрим движение поезда со скоростью 70 км/ч по переломам продольного профиля пути. В начальный момент времени поезд движется по горизонтальной площадке длиной 50 м, зазоры в междвагонных соединениях составляют 65 мм. Затем движение поезда осуществляется по участку пути вогнутого профиля, разность уклонов которого составляет 30 ‰, т. е. поезд движется по спуску длиной 500 м с уклоном 15 ‰, по сопрягающей кривой и по подъему длиной 500 м с уклоном 15 ‰ с дальнейшим выходом на прямолинейный участок пути длиной 850 м. Радиусы сопряжений выпуклых участков составляют 20000 м, вогнутого участка – 50000 м.

Анализ полученных результатов показал, что динамическая нагруженность конструкций вагонов-цистерн при движении поезда по переломам про-

дольного профиля пути “на выбеге” незначительно зависит от места их расположения в составе, при этом менее нагружены вагоны-цистерны при их расположении в первой половине состава.

Если при переходных режимах движения неоднородного поезда, содержащего сцеп из вагонов-цистерн, необходимо обеспечить наименьший уровень максимальных усилий, возникающих в межвагонных соединениях состава по всей его длине, то независимо от уровня недолива котлов цистерн жидким грузом вагоны-цистерны необходимо располагать в хвостовой части состава. Так, например, в случае 3 % уровня недолива жидкого груза в котлах цистерн при формировании поезда по схемам 1, 2 и 3 максимальные значения сжимающих усилий в межвагонных соединениях поезда соответственно составляют 1150 кН, 1114 кН и 1051 кН. В случае же формирования состава по схеме 4 максимальное значение сжимающего усилия составляет 938 кН.

При наличии в составе поезда сцепа вагонов-цистерн, котлы которых порожние, наиболее благоприятная схема формирования поезда соответствует расположению вагонов-цистерн в хвостовой части, что способствует понижению уровня продольных усилий, возникающих в поезде при переходных режимах движения. Эти результаты исследований согласуются с выводами работ [8, 9].

Выводы. При оценке влияния месторасположения сцепа вагонов-цистерн в составе грузового поезда и уровня недолива жидким грузом котлов цистерн на динамическую нагруженность конструкций вагонов при переходных режимах движения получено, что с целью повышения безопасности транспортировки экологически опасных грузов сцеп из вагонов-цистерн лучше располагать в первой половине состава так, чтобы было прикрыто сцепом сухогрузных грузовых вагонов, расположенным непосредственно за локомотивом.

Сцеп вагонов-цистерн, котлы которых порожние, для уменьшения уровня продольных усилий в межвагонных соединениях поезда целесообразно располагать в хвостовой части состава.

1. *Блохин Е. П.* Динамика поезда / *Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин.* – Москва : Транспорт, 1982. – 222 с.
2. *Богомаз Г. И.* Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / *Г. И. Богомаз.* – Киев : Наук. думка, 2004. – 223 с.
3. *Лазарян В. А.* Влияние неоднородности состава на продольные усилия в поезде при экстренном торможении / *В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. В. Белик* // Тр. ДИИТ. – 1973. – Вып. 143. – С. 3 – 8.
4. Нагруженность вагонов-цистерн при переходных режимах движения поездов / *Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, А. Н. Пишнько, С. В. Мямлин.* – Киев : Наук. думка, 2010. – 215 с.
5. *Лазарян В. А.* О переходных режимах движения поездов / *В. А. Лазарян* // Тр. ДИИТ. – 1973. – Вып. 152. – С. 3 – 43.
6. *Асадченко В. Р.* Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / *В. Р. Асадченко.* – М. : Маршрут, 2006. – 392 с.
7. *Иноземцев В. Г.* Тормоза железнодорожного состава. Вопросы и ответы / *В. Г. Иноземцев.* – М. : Транспорт, 1982. – 272 с.
8. *Мугинштейн Л. А.* Влияние продольных сил на опасность сходов порожних вагонов в поездах / *Л. А. Мугинштейн, Ю. С. Ромен* // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 3. – С. 3 – 6.
9. *Науменко Н. Е.* Оценка влияния схемы формирования неоднородного грузового поезда на динамическую нагруженность конструкций вагонов при переходных режимах движения / *Н. Е. Науменко, И. Ю. Хижа, Е. Г. Богомаз* // Техническая механика. – 2012. – № 2. – С. 7 – 13.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 30.07.13,
в окончательном варианте 03.09.13