



Лабораторные работы



Исследование факторов, влияющих на устойчивость вагона против опрокидывания при движении в кривой

Лабораторная работа №2

Лабораторная работа ориентирована на студентов, обучающихся по специальности "Подвижной состав железных дорог", с целью освоения методики оценки устойчивости железнодорожного экипажа против опрокидывания при движении в кривой

Команда "Универсального механизма" благодарит за помощь в разработке методических материалов **Антипина Дмитрия Яковлевича**, к.т.н., доцента кафедры "Подвижной состав железных дорог" Брянского государственного технического университета.

Консультант:

Д.Я. Антипин, к.т.н., доцент

Разработчики:

А.В. Сакало, к.т.н.

В.А. Сак, инженер

Оглавление

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	5
3. ЗАГРУЗКА МОДЕЛИ В UM SIMULATION	7
4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВАГОНА ПРОТИВ ОПРОКИДЫВАНИЯ.....	9
4.1. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ	9
4.2. ВЛИЯНИЕ МАССЫ ВАГОНА	11
4.3. ВЛИЯНИЕ РАДИУСА КРИВОЙ	13
4.4. ВЛИЯНИЕ ВОЗВЫШЕНИЯ НАРУЖНОГО РЕЛЬСА	14

1. Основные теоретические сведения

На движущийся в кривой вагон действует центробежная сила, которая при неблагоприятном сочетании с ветровой нагрузкой и инерционными силами, возникающими от колебаний кузова, стремится опрокинуть вагон наружу или внутрь кривой.

В соответствии с ГОСТ 33211-2014 устойчивость вагона от опрокидывания оценивают по коэффициенту запаса устойчивости от опрокидывания, определяемому по формуле

$$K_{yc} = \frac{P_{ст}}{P_{дин}} \geq [K_{yc}], \quad (1.1)$$

где $P_{ст}$ – статическая вертикальная сила давления колеса на рельс, Н;

$P_{дин}$ – динамическая вертикальная сила давления колеса на рельс, Н;

$[K_{yc}]$ – допускаемый коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания.

Допускаемый коэффициент запаса устойчивости принимается равным:

при проверке опрокидывания наружу кривой

$[K_{yc}] = 1,3$ – для грузовых вагонов;

$[K_{yc}] = 1,5$ – для пассажирских и изотермических вагонов;

при проверке опрокидывания внутрь кривой

$[K_{yc}] = 1,2$ – для грузовых вагонов;

$[K_{yc}] = 1,3$ – для пассажирских и изотермических вагонов.

2. Описание лабораторной работы

Лабораторная работа ориентирована на студентов железнодорожного направления с целью освоения методики оценки устойчивости железнодорожного экипажа против опрокидывания при движении в кривой с помощью программного комплекса "Универсальный механизм" (ПК УМ). ПК УМ состоит из двух частей: программы ввода **UM Input** и программы моделирования **UM Simulation**. В программе ввода создаётся динамическая модель, а в программе моделирования производятся расчёты. На данном этапе не рассматриваются принципы создания динамической модели и её структура, а используется готовая модель со всеми настройками.

Цель работы: освоение методики оценки устойчивости вагона против опрокидывания при движении в кривой с помощью ПК УМ и исследование факторов, влияющих на безопасность движения по критерию опрокидывания вагона.

В лабораторной работе будем использовать модель грузового вагона *simple_18_100* из свободно распространяемой библиотеки ПК УМ. Упрощённая компьютерная модель четырёхосного грузового вагона на трёхэлементных тележках модели 18-100 с центральным рессорным подвешиванием представлена на рис. 1.

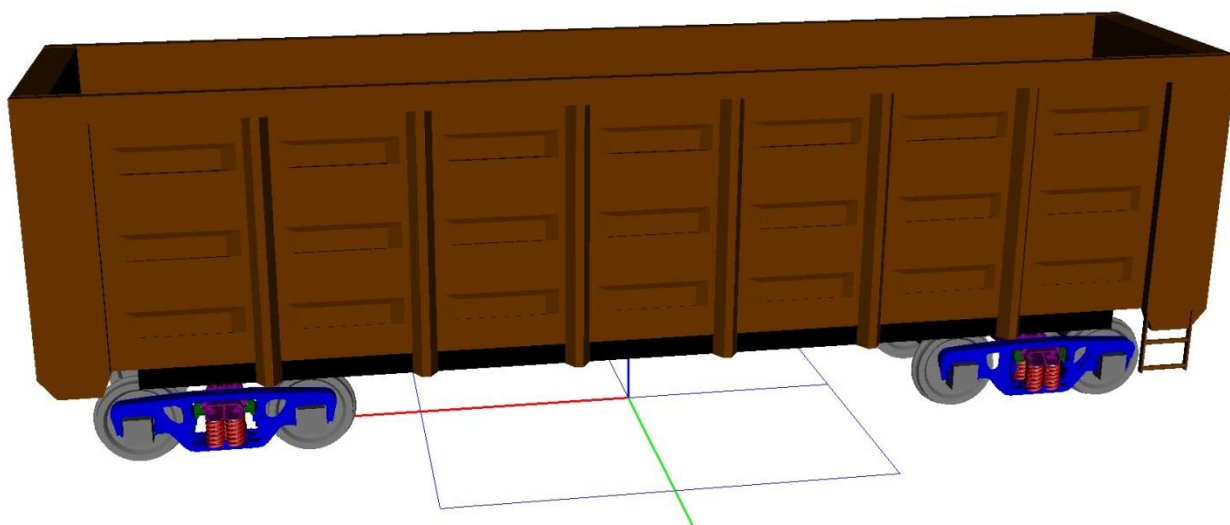


Рис. 1. Общий вид готовой модели грузового вагона в программе ввода **UM Input**

Расположение файлов модели грузового вагона зависит от версии установленного на вашем компьютере ПК УМ:

– ПК УМ 2023 (ПК УМ 10), готовую модель можно найти в папке

[{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#)

– ПК УМ 9, готовую модель можно скачать по адресу

http://www.universalmechanism.com/download/models/simple_18_100x2.zip

Для версий ПК УМ, предшествующих девятой, модель недоступна.

Описание лабораторной работы выполнено с использованием ПК УМ 9. В ПК УМ последующих версий некоторые элементы интерфейса программы могут отличаться от приведенных в этом документе.

Критерий (1.1) можно трактовать как степень статической обезгрузки колёс одной стороны вагона. Например, предельное значение коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания грузового вагона наружу при движении в правой кривой $[K_{yc}] = 1,3$ означает предельную степень обезгрузки колёс правой стороны вагона на 30%. Тогда критерий безопасности может быть записан в виде

$$P_{дин} \geq 0,7P_{ст}. \quad (2.1)$$

Если $P_{дин} < 0,7P_{ст}$, то есть колёса правой стороны вагона обезгрузились более чем на 30% по отношению к статической вертикальной нагрузке, то устойчивость вагона от опрокидывания наружу в кривой не обеспечена.

Правую часть неравенства (2.1) для любых случаев можно рассчитать по формуле

$$P_{пред} = \frac{Mg}{2n_b} (2 - [K_{yc}]), \quad (2.2)$$

где $P_{пред}$ – предельное значение силы, Н;

M – масса вагона, кг;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

n_b – число осей вагона.

Таким образом, устойчивость вагона от опрокидывания в кривой будет обеспечена, если динамические силы $P_{дин}$, получаемые в процессе моделирования движения вагона, будут больше предельного значения силы $P_{пред}$. Пример расчёта приведен на рис. 2.

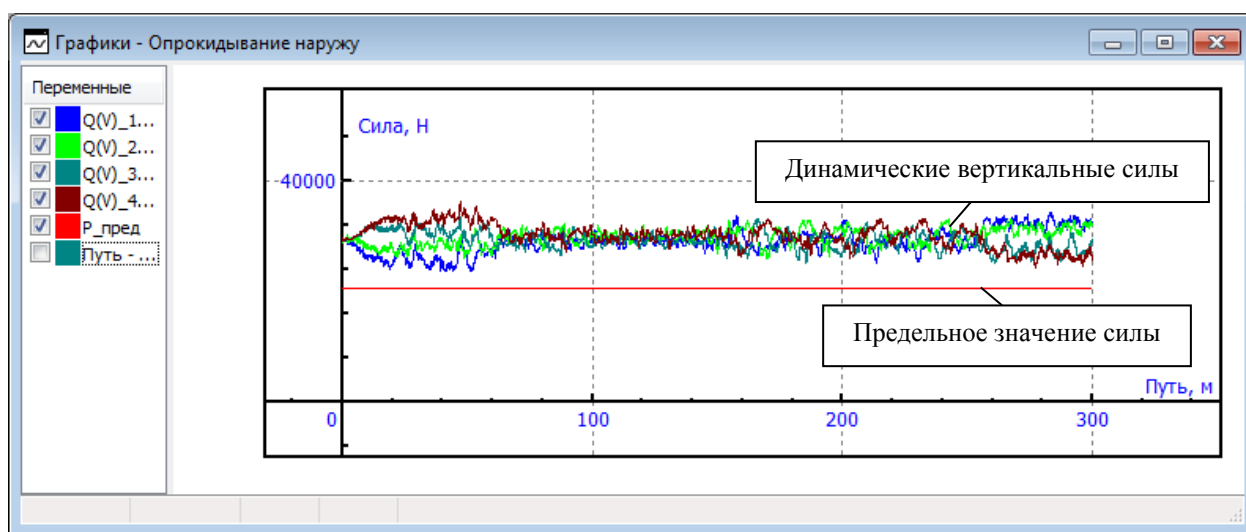


Рис. 2. Оценка устойчивости грузового вагона против опрокидывания наружу кривой

3. Загрузка модели в UM Simulation

Откройте модель вагона в программе моделирования **UM Simulation** и загрузите подготовленную конфигурацию. Для этого выполните следующие действия:

1. Запустите программу **UM Simulation** с помощью **Пуск | Все программы | Универсальный механизм 9 | UM Simulation**.
2. Откройте модель *simple_18_100*, выбрав пункт меню **Файл | Открыть** или воспользуйтесь горячей клавишей **F3**.
3. Загрузите подготовленную конфигурацию **lab_2** с помощью пункта меню **Файл | Загрузить конфигурацию**. Конфигурация включает в себя следующие основные настройки: степень загрузки вагона – порожний, тип пути – кривая радиуса 600 м, скорость экипажа 10 м/с, возвышение наружного рельса 0,05 м.

После загрузки конфигурации будут открыты четыре окна: *анимационное окно*, *окно анимации контакта* и два *графических окна* – "Опрокидывание наружу" и "Опрокидывание внутрь" (рис. 3 и рис. 4).

В настройках макрогеометрии пути задана правая кривая, поэтому при опрокидывании вагона наружу обезгруживаются правые колёса, а при опрокидывании внутрь – левые. Для удобства анализа получаемых результатов значения вертикальных динамических сил $P_{дин}$ для колёс правой и левой стороны вагона размещены в разных окнах.

Графическое окно "Опрокидывание наружу" содержит переменные **Q(V)_1r**, **Q(V)_2r**, **Q(V)_3r** и **Q(V)_4r** – динамические вертикальные силы для правых колёс первой, второй, третьей и четвёртой колёсной пары соответственно. Переменная **P_пред** – предельная сила, рассчитанная по формуле (2.2) с использованием допускаемого коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания наружу кривой $[K_{yc}] = 1,3$.

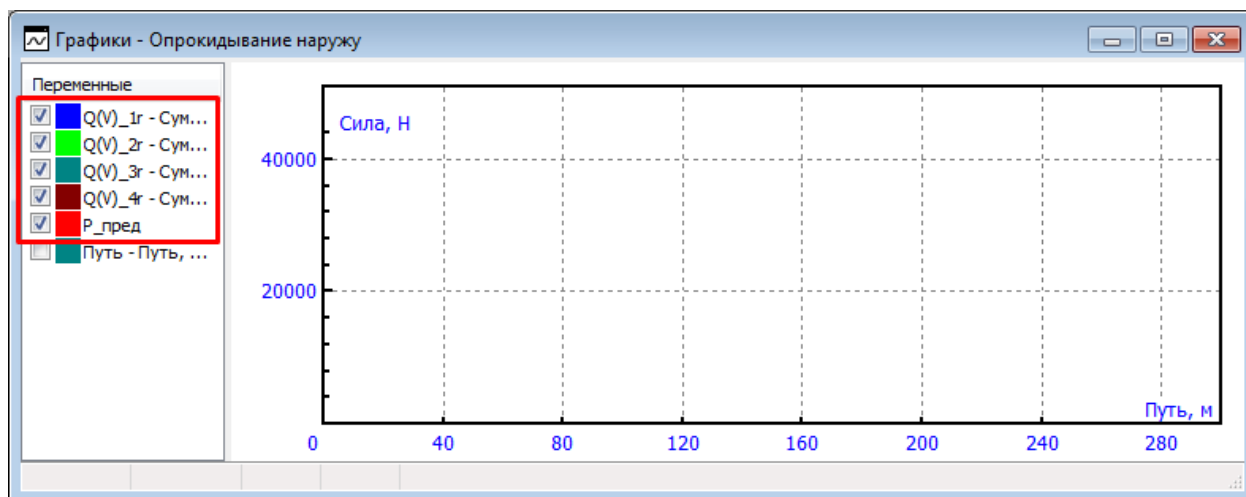


Рис. 3. Графическое окно "Опрокидывание наружу"

Графическое окно "Опрокидывание внутрь" содержит переменные **Q(V)_1l**, **Q(V)_2l**, **Q(V)_3l** и **Q(V)_4l** – динамические вертикальные силы для левых колёс первой, второй, третьей и четвёртой колёсной пары соответственно. Переменная **P_пред** – предельная си-

ла, рассчитанная по формуле (2.2) с использованием допускаемого коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания внутрь кривой $[K_{yc}] = 1,2$.

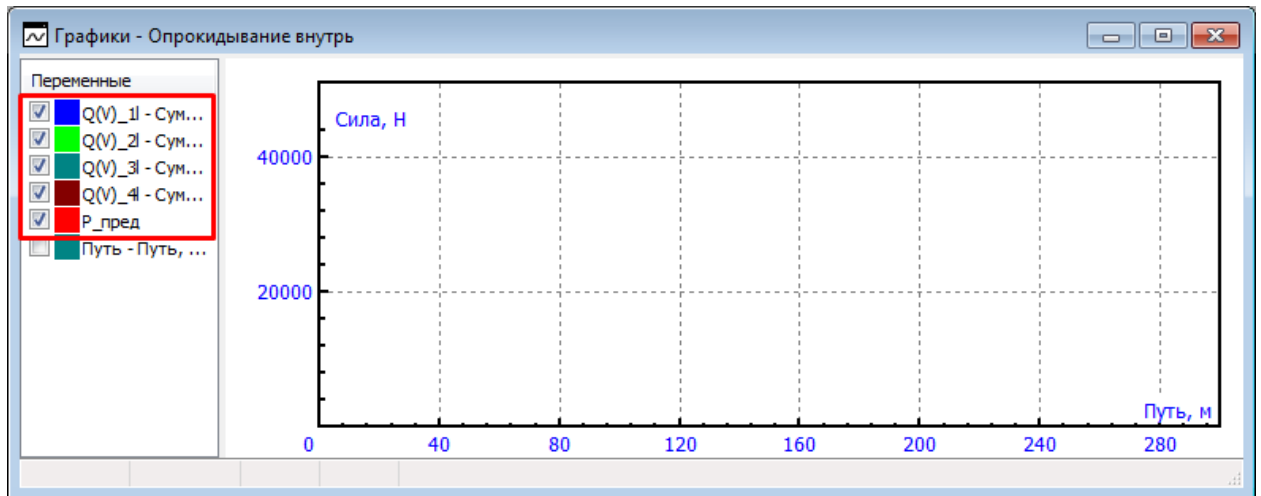


Рис. 4. Графическое окно "Опрокидывание внутрь"

Замечание. Переменная **P_пред** для обоих графических окон вычисляется по формуле (2.2) с использованием встроенной в программу переменной массы вагона M , поэтому при изменении загрузки вагона значение предельной силы $P_{пред}$ будет автоматически пересчитываться.

4. Факторы, влияющие на устойчивость вагона против опрокидывания

4.1. Влияние скорости

Рассмотрим, как влияет скорость на безопасность движения вагона в кривой в случаях опрокидывания вагона наружу и внутрь кривой. Для этого выполним серию тестов: смоделируем движение порожнего вагона в кривой радиуса **600 м** со скоростями **10 м/с**, **15 м/с** и **20 м/с**.


1. Выберите пункт меню **Анализ | Моделирование** или нажмите горячую клавишу **F9**. После этого появится окно **Инспектора моделирования объекта**.
2. Перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов | Весь список** и убедитесь, что у идентификатора скорости v_0 задано значение **10 м/с**.
3. Нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом моделирования в анимационном и графических окнах. По окончании моделирования появится окно с соответствующим сообщением, нажмите **ОК**. После этого будет активно окно **Режима паузы процесса моделирования**, не закрывайте его.
4. Оценим минимальное значение вертикальной динамической силы $P_{\text{дин}}$ для правых и левых колёс. Для этого воспользуемся встроенным табличным процессором для переменных. Выберите пункт меню **Инструменты | Табличный процессор** или нажмите кнопку табличного процессора  на панели быстрого доступа. Для удобства обработки данных откройте два табличных процессора.
5. В графическом окне "Опрокидывание наружу" выделите переменные, соответствующие вертикальным динамическим силам и перетащите их с помощью левой кнопки мыши в одно из окон табличного процессора. Выберите в табличном процессоре функцию **Min**. Минимальное значение динамической вертикальной силы $P_{\text{дин}}$ для правых колёс получилось у колеса первой колёсной пары, которое составляет **23601 Н**, что больше предельной силы $P_{\text{пред}}$, равной **20575 Н** (см. по графику), следовательно, устойчивость вагона против опрокидывания наружу кривой радиуса **600 м** при скорости **10 м/с** обеспечена.
6. То же самое проделайте с переменными вертикальных сил из графического окна "Опрокидывание внутрь". Минимальное значение динамической вертикальной силы $P_{\text{дин}}$ для левых колёс получилось у колеса четвёртой колёсной пары, которое составляет **22517 Н**, что меньше предельной силы $P_{\text{пред}}$, равной **23514 Н** (см. по графику), следовательно, устойчивость вагона против опрокидывания внутрь кривой при скорости **10 м/с** не обеспечена.
7. Выполните пункты 2-6 для скоростей **15 м/с** и **20 м/с** и занесите результаты в таблицы (Таблица 1 и Таблица 2).

Таблица 1

Влияние скорости на устойчивость вагона против опрокидывания наружу кривой

Скорость	10 м/с	15 м/с	20 м/с
Пределная сила $P_{\text{пред}}$, Н	20575	20575	20575
Минимальная вертикальная сила для правых колёс $P_{\text{дин}}$, Н	23601		
Устойчивость	<i>Обеспечена</i>		

Таблица 2

Влияние скорости на устойчивость вагона против опрокидывания внутрь кривой

Скорость	10 м/с	15 м/с	20 м/с
Пределная сила $P_{\text{пред}}$, Н	23514	23514	23514
Минимальная вертикальная сила для левых колёс $P_{\text{дин}}$, Н	22517		
Устойчивость	<i>Не обеспечена</i>		

4.2. Влияние массы вагона

Как мы выяснили, устойчивость порожнего вагона при движении в кривой радиуса **600 м** со скоростью **10 м/с** при опрокидывании наружу обеспечена, а при опрокидывании внутрь не обеспечена. Сравним показатели устойчивости для случаев опрокидывания вагона наружу и внутрь кривой при этой же скорости для гружёного вагона.


1. Перейдите в окно **Инспектора моделирования объекта**. Сейчас загружен файл параметров для порожнего вагона. Для того чтобы исследовать движение вагона в гружёном состоянии, необходимо загрузить соответствующий файл параметров.
2. На вкладке **Идентификаторы | Список идентификаторов** нажмите кнопку **Загрузить из файла**. В появившемся окне выберите **Loaded car.par** и нажмите кнопку **Открыть**.
3. В появившемся окне **Список прочитанных идентификаторов** нажмите кнопку **Принять**.
4. Файл параметров для гружёного вагона загружен. Назначьте начальную скорость $v_0 = 10$ м/с.
5. Загрузим файл с начальными условиями для вагона в гружёном состоянии. В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Начальные условия | Координаты** и нажмите кнопку **Загрузить значения координат и скоростей из файла** . В появившемся окне выберите файл **equilibrium_loaded_car.xv** и нажмите **Открыть**. После этого для модели будут загружены начальные условия, соответствующие гружёному вагону.
6. В окне **Инспектора моделирования объекта** нажмите кнопку **Интегрирование**. По окончании процесса моделирования перетащите переменные вертикальных сил $P_{дин}$ из графического окна в окна табличного процессора.
7. Обработайте результаты в табличном процессоре для обоих случаев: определите минимальные значения динамических вертикальных сил $P_{мин}$. Для точного определения предельной силы $P_{пред}$ переменную **P_пред** можно также поместить в табличный процессор. Оцените, как изменились значения отношения $P_{мин}/P_{пред}$ для гружёного вагона относительно порожнего вагона. Занесите результаты в таблицы (Таблица 3 и Таблица 4).

Таблица 3

Влияние массы вагона на устойчивость против опрокидывания наружу кривой

$P_{пред}$ для порожнего вагона, кН	$P_{пред}$ для груженого вагона, кН	$P_{мин}$ для порожнего вагона, кН	$P_{мин}$ для груженого вагона, кН	$P_{мин}/P_{пред}$ для порожнего вагона	$P_{мин}/P_{пред}$ для груженого вагона
20575		23601		1,13	
Устойчивость				Обеспечена	

Таблица 4

Влияние массы вагона на устойчивость против опрокидывания внутрь кривой

$P_{\text{пред}}$ для порожнего вагона, кН	$P_{\text{пред}}$ для груженого вагона, кН	$P_{\text{мин}}$ для порожнего вагона, кН	$P_{\text{мин}}$ для груженого вагона, кН	$P_{\text{мин}}/P_{\text{пред}}$ для порожнего вагона	$P_{\text{мин}}/P_{\text{пред}}$ для груженого вагона
23514		22517		0,96	
Устойчивость				Не обеспечена	

4.3. Влияние радиуса кривой

Определим, как влияет радиус кривой на устойчивость вагона против опрокидывания при движении в кривой. Для того чтобы посмотреть описание тестовой кривой, откройте инспектор моделирования объекта (**Анализ | Моделирование**) и перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия**.

1. Измените в поле **R1** значение с **600** на **300** и нажмите **Enter**.
2. В появившемся окне подтверждения нажмите **Да**. Запустите интегрирование.
3. После окончания процесса интегрирования обработайте значения переменных вертикальных сил $P_{\text{дин}}$ в табличном процессоре, как это делалось для предыдущих тестов.
4. Сравните минимальные значения вертикальных сил $P_{\text{дин}}$ для случаев опрокидывания наружу и внутрь кривой с получившимися минимальными значениями $P_{\text{мин}}$ из предыдущего теста "Влияние массы вагона", занесите результаты в таблицу (Таблица 5).

Таблица 5

Влияние радиуса кривой на устойчивость вагона против опрокидывания

	$P_{\text{мин}}$ для гружёного вагона при радиусе 600 м	$P_{\text{мин}}$ для гружёного вагона при радиусе 300 м	Устойчивость
Опрокидывание наружу кривой			
Опрокидывание внутрь кривой			

4.4. Влияние возвышения наружного рельса

Рассмотрим, как влияет возвышение наружного рельса на устойчивость вагона против опрокидывания при движении в кривой.

1. Вернитесь в окно Инспектора моделирования объекта, перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия** и в поле **Н1** измените значение возвышения с **0.05** на **0.08**.
2. Запустите интегрирование. После окончания моделирования обработайте результаты в табличном процессоре, как и в предыдущих тестах.
3. Сравните полученные значения минимальных вертикальных сил $P_{\text{мин}}$ для обоих случаев опрокидывания вагона со значениями из предыдущего теста "*Влияние радиуса кривой*". Занесите результаты в таблицу (Таблица 6).

Таблица 6

**Влияние возвышения наружного рельса на устойчивость вагона
против опрокидывания**

	$P_{\text{мин}}$ при возвышении $H=0,05$ м	$P_{\text{мин}}$ при возвышении $H=0,08$ м	Устойчивость
Опрокидывание наружу кривой			
Опрокидывание внутрь кривой			

Сделайте выводы о влиянии четырёх рассмотренных в работе факторов на устойчивость вагона против опрокидывания при движении в кривой.