

УДК 656.212

О. В. ДЕМЬЯНЧУК, инженер, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЗАКРЕПЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ СТАЦИОННЫМИ ТОРМОЗНЫМИ БАШМАКАМИ

Выполнен анализ зависимости силы ветра, действующей на неподвижный железнодорожный состав, от вида вагонов, температуры наружного воздуха и направления ветра. Показано, что наибольшая сила соответствует вагону-хопперу, а наименьшие – полувагону и крытому вагону. Получены значения эквивалентного уклона, при котором движущая сила, соответствующая действию ветра, равна проекции силы тяжести. Показано, что для груженых до полной грузоподъемности вагонов, размещенных на горизонтальном пути, одного дополнительного тормозного башмака достаточно при скорости ветра до 15 м/с. В то же время при размещении на таком пути порожних вагонов тормозные башмаки могут потребоваться, при скорости ветра от 7 м/с.

В настоящее время при закреплении железнодорожного подвижного состава от ухода используются Методические рекомендации по расчету норм закрепления подвижного состава тормозными башмаками [1]. Однако практический опыт закрепления вагонов на станционных путях показывает, что определенное по нормам потребное количество тормозных башмаков оказывается завышенным. С другой стороны, известны случаи ухода вагонов при точном выполнении рекомендаций по закреплению составов.

Один из путей решения проблемы закрепления вагонов связан с усовершенствованием конструкций тормозных башмаков и применением новых устройств закрепления. В работах [2–4] рассматриваются результаты испытаний новых стояночных башмаков, выполнен анализ их работы по удержанию состава и рассмотрены условия, необходимые для перекаtywания колеса через башмак.

Авторами работы [5] выполнен анализ методик расчета требуемого количества тормозных башмаков для закрепления подвижного состава на станционных путях, которые были приняты на железных дорогах СССР. Доказано, что учет массы грузовых поездов позволяет уменьшить нормы закрепления при условии обеспечения безопасности движения. На основе результатов расчетов предложена усовершенствованная методика определения количества тормозных башмаков.

Современный уровень информатизации позволяет более полно учитывать условия, при которых осуществляется закрепление, и обеспечивать безопасность эксплуатации подвижного состава.

Авторами работ [6, 7] рассмотрено развитие методики расчета норм закрепления подвижного состава, которая решить проблему отсутствия вариантов расчета закрепления составов поездов, состоящих из разнородного подвижного состава. Методика позволяет производить расчет количества тормозных башмаков в зависимости от выбора вариантов их укладки под определенные вагоны. Также проведено сравнение норм закрепления, определенных на основании действующей и предлагаемой к рассмотрению методики.

В статье [8] на основании анализа результатов проведенной серии испытаний по закреплению железнодорожного подвижного состава тормозными башмаками установлена необходимость пересмотра существующих норм. В качестве одного из возможных способов решения проблемы закрепления подвижного состава на путях станции предложено применение механизированных устройств закрепления.

В работах [9, 10] выполнен анализ характера влияния места расположения состава на станционных путях, состоящих из отдельных участков с разными значениями уклона продольного профиля, на силу, которую должны обеспечить тормозные башмаки для удержания состава. В статье [10] показано, что наибольшую вероятность самопроизвольного ухода имеют хопперы за счет высокого коэффициента воздушного сопротивления, причем значения силы от воздействия ветровой нагрузки сопоставимы со сдвигающей силой, связанной с уклоном железнодорожного пути.

В существующих нормах и правилах закрепления подвижного состава тормозными башмаками [1] указана необходимость укладки дополнительных тормозных башмаков при сильном (более 15 м/с) и очень сильном (штормовом) ветре. С другой стороны, в практике гидрометеорологии в качестве основных характеристик ветра также выделяют его направление и скорость. Причем в зависимости от диапазонов скоростей выделяют ветры: слабый (0–5 м/с), умеренный (6–14 м/с), сильный (15–24 м/с), очень сильный (25–32 м/с) и ураганный (33 м/с и более) [11].

В работах [12, 13] исследуется экспериментальным способом возможность опрокидывания железнодорожного подвижного состава в результате воздействия сильного бокового ветра. Авторами работы [12] установлено, что максимальное значение опрокидывающего момента соответствует величине угла, равной 50°.

В работе [13] построена имитационная модель движения высокоскоростных поездов, исследовано влияние на них бокового ветра. Авторами [14] предложен способ анализа системы взаимодействия железнодорожного подвижного состава и моста с учетом турбулентности ветра, получены формулы для расчета его силы.

Таким образом, достаточно широко исследованы общие вопросы, связанные с анализом ветровой нагрузки, действующей на железнодорожный подвижной состав, однако факторы, которые вызывают смещение составов, расположенных на станционных путях, не изучены в полной мере. В представленной работе поставлена задача по определению влияния различных факторов, связанных с ветром, на потребность в дополнительных тормозных башмаках для закрепления составов.

Сдвигающая сила, действующая на состав поезда, с учетом сопротивления среды и ветра [15]

$$P_{\text{сдвиг}} = Q_{\text{брутто}} g \sin \alpha - W \pm R_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{брутто}}$ – масса состава поезда, т; α – уклон рассматриваемого пути; W – сила сопротивления движению

состава, Н; R_b – сила давления ветра, Н (знак «+» при попутном ветре, знак «-» – при его тормозящем действии), которая определяется по формуле [16]

$$R_b = \frac{17,8g(C_x S_1 + \sum_{i=2}^m C_{xvi} S_i)}{(273+t)} v_b^2, \quad (2)$$

C_x – коэффициент обтекаемости первого вагона в составе; S_1, S_i – соответственно площадь поперечного сечения первого и i -го вагонов в составе [16, таблица 6]; C_{xvi} – коэффициент обтекаемости остальных вагонов в составе, стоящих за первым; m – число вагонов в составе поезда; v_b – скорость ветра; t – температура наружного воздуха, °С.

Для неблагоприятных условий (зима)

$$t = t_{cp} + 0,3\tau(t_{min} - t_{cp}), \quad (3)$$

где t_{cp} – средняя месячная температура воздуха в зимний период, для Республики Беларусь $t_{cp} = -5$ °С; τ – нормированное отклонение от среднего значения, принимается $\tau = 2,0$ [16, с. 19]; t_{min} – абсолютный минимум температур для региона, $t_{min} = -42$ °С.

Таблица 1 – Значения коэффициентов воздушного сопротивления вагонов

Род вагона	Число осей	S, m^2	Кoeffициент	Угол α между вектором скорости ветра и направлением движения отцепа, град						
				0	10	20	30	50	70	90
Полувагон	4	8,5	C_x	1,36	1,68	1,83	1,76	1,11	0,43	0,1
			C_{xx}	0,5	0,69	0,88	0,88	0,8	0,43	0,1
Крытый	4	9,7	C_x	1,12	1,46	1,64	1,58	0,92	0,29	0,1
			C_{xx}	0,22	0,38	0,56	0,67	0,85	0,29	0,1
Полувагон	8	10,7	C_x	1,56	1,95	2,09	2,03	1,15	0,4	0,15
			C_{xx}	0,75	0,97	1,13	1,16	0,88	0,4	0,15
Платформа	4	4,1	C_x	1,51	2,02	2,30	2,23	1,3	0,40	0,1
Цистерна	4	9,8	C_x	0,59	0,82	0,96	0,96	0,56	0,19	0,05
Цистерна	8	10,3	C_x	0,81	1,08	1,22	1,10	0,65	0,19	0,05
Хоппер	4	9,9	C_x	0,92	1,18	1,38	1,46	1,21	0,68	0,25

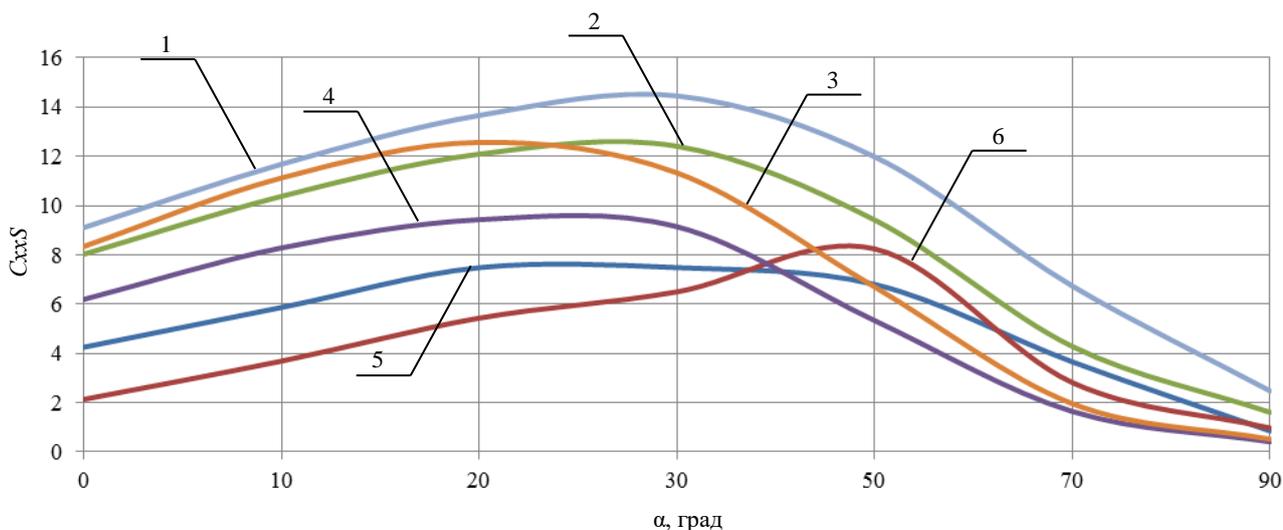


Рисунок 1 – Зависимость произведения коэффициента воздушного сопротивления и площади поперечного сечения вагонов от угла α между вектором скорости ветра и направлением возможного движения состава:

1 – хоппер; 2 – восьмиосный полувагон; 3 – восьмиосная цистерна; 4 – платформа; 5 – четырехосный полувагон; 6 – крытый вагон

Для благоприятных условий (лето)

$$t = t_{cp} + 0,3\tau(t_{max} - t_{cp}), \quad (4)$$

где t_{cp} – средняя месячная температура воздуха в летний период, для Республики Беларусь $t_{cp} = +18$ °С; t_{max} – абсолютный максимум температур для региона, $t_{max} = +42$ °С.

Значения коэффициентов C_x и C_{xvi} , а также площадь поперечного сечения вагона определяются по таблице 1 [16].

На рисунке 1 представлена зависимость произведения коэффициента воздушного сопротивления и площади поперечного сечения различных типов вагонов от угла α между вектором скорости ветра и направлением движения отцепа.

Таким образом, наиболее неблагоприятный угол между результирующим вектором скорости ветра и направлением движения отцепа, при котором сила давления ветра принимает наибольшее значение, составляет примерно 30°, за исключением крытого вагона, для которого величина данного угла – 50°.

На основании приведенного графика можно сделать вывод о том, что наиболее подвержены уходу под влиянием силы давления ветра вагоны-хопперы.

На рисунке 2 приведены зависимости силы давления ветра на составы из 25 полувагонов и 25 хопперов при скоростях ветра от 1 до 30 м/с для разных температур воздуха, которые показывают, что тип вагона больше влияет на силу давления ветра, чем температура.

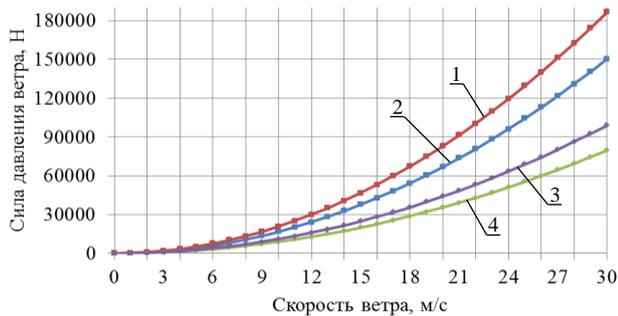


Рисунок 2 – Зависимость силы давления ветра, действующей на состав из 25 вагонов, от скорости ветра ($\alpha = 30^\circ$): 1 – хопперы при температуре воздуха -5°C ; 2 – хопперы при температуре $+18^\circ\text{C}$; 3 – полувагоны при температуре -5°C ; 4 – полувагоны при температуре $+18^\circ\text{C}$

На рисунке 3 приведены зависимости силы давления ветра от скорости ветра для различных типов вагонов при наиболее неблагоприятном направлении ветра и низкой температуре, которые показывают, что наибольшая сила соответствует вагону-хопперу, а наименьшие – полувагону и крытому вагону.

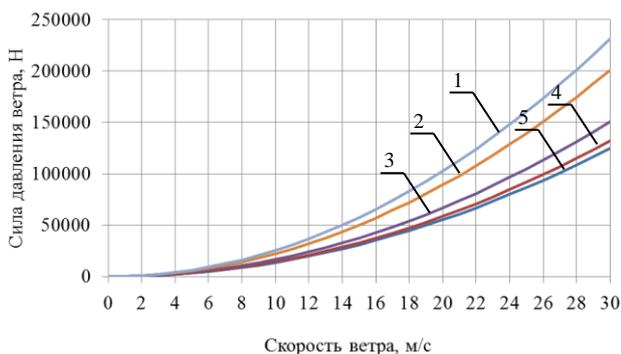


Рисунок 3 – Зависимость силы давления ветра от скорости ветра для разных типов вагонов: 1 – хоппер; 2 – восьмиосная цистерна; 3 – платформа; 4 – крытый вагон; 5 – четырёхосный полувагон

Для оценки действия силы давления ветра на состав введем в рассмотрение эквивалентный уклон

$$i_3 = \frac{R_{\text{в}}}{Q_{\text{брутто}} g}, \quad (5)$$

при котором движущая сила, соответствующая действию ветра, равна проекции силы тяжести.

Зависимости эквивалентного уклона от скорости ветра для составов из 25 груженых и 25 порожних вагонов приведены на рисунке 4 (масса груженого и порожнего вагонов принята 90 и 22,5 т соответственно). Из этих зависимостей следует, что при скорости ветра, близкой к 15 м/с, вагоны, загруженные до полной грузоподъемности, испытывают такую же сдвигающую силу, которая наблюдается при установке тех же вагонов на путь с уклоном 2,5 ‰ в безветренную погоду. При расчете по существующим нормам такая ситуация требует постановки трех тормозных башмаков. С другой стороны, при скоростях ветра, близких к 15 м/с,

порожние вагоны-хопперы подвергаются таким же силам давления ветра, которые возникают при их установке на путь с уклоном 10 ‰, для которого использование тормозных башмаков запрещено, и удержание состава требуется осуществлять локомотивом, а эквивалентному уклону 2,5 ‰ соответствует скорость ветра 7,3 м/с.

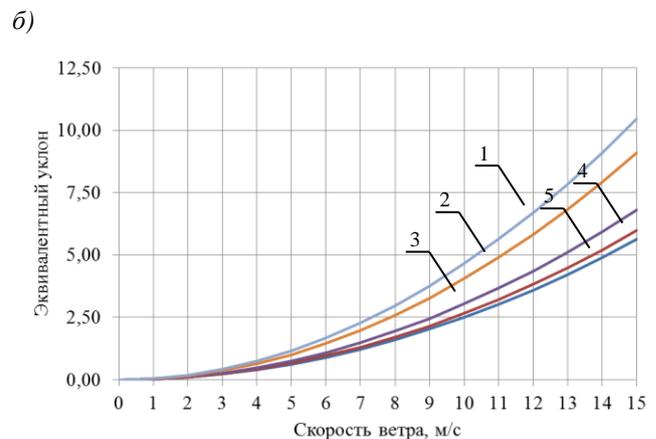
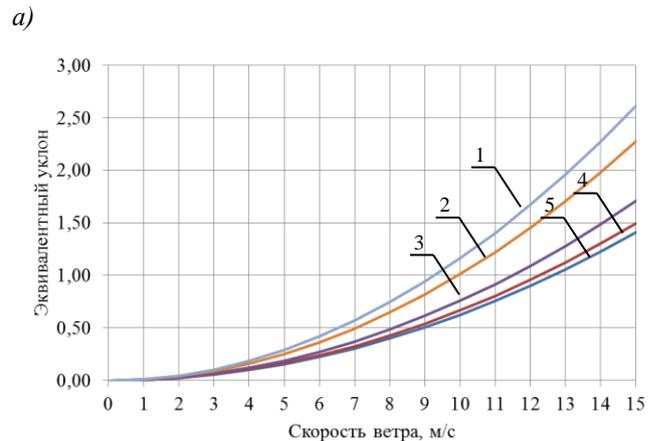


Рисунок 4 – Влияние скорости ветра на эквивалентный уклон для состава из груженых (а) и порожних (б) вагонов: 1 – хоппер; 2 – восьмиосная цистерна; 3 – платформа; 4 – крытый вагон; 5 – четырёхосный полувагон

Оценим потребное количество K тормозных башмаков для предотвращения ухода порожних и груженых составов поездов от действия силы давления ветра.

При одинаковой массе всех вагонов

$$K = \frac{P_{\text{сдвиг}}}{P_{\text{уд}}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удерживающая сила, соответствующая одному башмаку,

$$P_{\text{уд}} \leq \frac{k Q_{\text{брутто}}}{n}, \quad (7)$$

на не имеющих сильных загрязнений путях и при отсутствии осадков, ухудшающих сцепление колеса с рельсом, $k = 2,5$, а в случае сильно замасленных поверхностей рельсов или при наличии атмосферных осадков, уменьшающих трение, $k = 1$ [17]; n – число осей вагона.

Округление осуществляется в большую сторону.

Сдвигающая сила, приходящаяся на 1 тормозной башмак при укладке под порожний вагон, составляет

$$P_{\text{сдвиг}} = \frac{2,5 \cdot 22,5 \cdot 10^3}{4} = 13795,3 \text{ Н};$$

при укладке под груженный вагон

$$P_{\text{сдвиг}} = \frac{2,5 \cdot 90 \cdot 10^3}{4} = 55181,3 \text{ Н.}$$

В таком случае предельные скорости ветра, при которых требуется постановка тормозных башмаков, определяются в соответствии с таблицами 2 и 3.

Таблица 2 – Значения предельных скоростей ветра, при которых требуется укладка дополнительных тормозных башмаков под порожний состав

В метрах в секунду

Род вагона	Число n дополнительных тормозных башмаков			
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
Четырехосный полувагон	10	14	17	20
Крытый	9	13	16	19
Восьмиосный полувагон	7	11	13	15
Платформа	9	12	15	18
Четырехосная цистерна	9	12	15	18
Восьмиосная цистерна	7	11	13	15
Хоппер	7	10	12	14

Таблица 3 – Значения предельных скоростей ветра, при которых требуется укладка дополнительных тормозных башмаков под грузеный состав

В метрах в секунду

Род вагона	Число n дополнительных тормозных башмаков	
	$n = 1$	$n = 2$
Четырехосный полувагон	20	Более 25
Крытый	19	Более 25
Восьмиосный полувагон	15	22
Платформа	18	Более 25
Четырехосная цистерна	18	Более 25
Восьмиосная цистерна	15	22
Хоппер	14	20

Таким образом, выполненный анализ показывает, что при размещении на станционных путях порожних вагонов уже при скорости 7 м/с может потребоваться укладка дополнительных тормозных башмаков, в то время как существующими нормативами установка дополнительных тормозных башмаков предполагается при скорости ветра 15 м/с и более. Поэтому учет ветровой нагрузки при определении необходимого количества тормозных башмаков, потребного для удержания железнодорожных составов, целесообразно осуществлять с учетом более подробной классификации видов ветра, используемой в практике гидрометеорологии [11]. Такой учет, с одной стороны, позволит предотвратить уход вагонов, а с другой – уменьшить затраты средств на постановку резервных (лишних) тормозных башмаков.

Список литературы

1 Методические рекомендации по расчету норм закрепления подвижного состава тормозными башмаками на станционных путях станций Белорусской железной дороги. – Минск, 2006.

Получено 02.11.2021

V. U. Dzemyanchuk. Analysis of the wind load influence on rolling stocks fixing by station brake shoes.

There is carried out the analysis of the dependence of the wind force acting a motionless rolling stock on the railway cars type, outside air temperature and wind direction. It is shown that the greatest force corresponds to a hopper-car, and the smallest – to a gondola car and a boxcar. There are obtained the equivalent slope values for the case when the acting force simulating the corresponding wind force is equal to the gravity force projection. It is shown that for cars loaded to load limit and placed on a flat track, one additional brake shoe is sufficient at a wind speed of up to 15 m/s. At the same time, if the empty cars are placed on such a track, brake shoes may be required starting from a wind speed of 7 m/s.

2 Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на станционных путях. Полигонные испытания / Д. П. Марков [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75, № 5. – С. 308–317.

3 Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания / Д. П. Марков [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 3. – С. 153–158.

4 Горочные и стояночные тормозные башмаки: этапы внедрения / Д. П. Марков [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2018. – № 1 (53). – С. 33–35.

5 Козаченко, Д. М. Удосконалення норм закріплення рухомого складу на станційних коліях / Д. М. Козаченко, О. М. Пасічний, С. В. Іващенко // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2013. – № 34. – С. 119–125.

6 Ильин, А. М. Многовариантная верификационная методика расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях станций / А. М. Ильин, О. Н. Числов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 115–123.

7 Числов, О. Н. Развитие автоматизированной методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных железнодорожных путях / О. Н. Числов, А. М. Ильин // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д : РГУПС, 2018. – С. 247–251.

8 Козаченко, Д. М. Проблеми закріплення рухомого складу на коліях залізничних станцій / Д. М. Козаченко // Залізничний транспорт України. – 2013. – Вип. 3/4 (100/101). – С. 69–73.

9 Демьянчук, О. В. Зависимость силы, требуемой для удержания поезда от ухода, от расположения состава на станционных путях / О. В. Демьянчук // Сборник студенческих научных работ. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Вып. 26. – Ч. 1. – С. 119–123.

10 Смирнов, В. И. О равновесном уклоне станционного профиля / В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2020. – Вып. 4. – Т. 17. – С. 575–582.

11 ТКП 17.10-06-2008 (02120). Технический кодекс установившейся практики Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения. – Введ. 01.01.2009. – Минск : Минприроды, 2009. – 36 с.

12 Cooper, R. K. The Effect of Cross-Winds on Trains. / R. K. Cooper // Journal of Fluids Engineering. – 1981. – No. 103 (1). – P. 170–178.

13 Effect of wind speed variation on the dynamics of a high-speed train / Liu D. [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2019. – Vol. 57, No. 2. – С. 247–268.

14 Analysis on running safety of train on bridge with wind barriers subjected to cross wind / T. Zhang [et al.] // Wind Struct. – 2013. – Т. 17, no. 2. – С. 203–225.

15 Сахаров, П. А. Оценка влияния характеристик межвагонных связей в поезде на величину продольных сил при электрическом торможении / П. А. Сахаров, А. О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Вып. 12. – С. 171–181.

16 Луговцов, М. Н. Проектирование сортировочных горок / М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 170 с.

17 Экспериментальные исследования характеристик сцепления в контакте «колесо – рельс» при наличии промежуточной среды / А. И. Костюкевич [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Автомобиле- и тракторостроение. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 56. – С. 56–62.