

---



---



---

## ЭКОЛОГИЯ

---



---



---

УДК 631.372:629.114

### ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА ЭРОЗИЮ ПОЧВЫ

*Докт. техн. наук, проф. ЯЦКЕВИЧ В. В., канд. техн. наук, доц. ЗЕЛЁНЫЙ П. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Пахотные земли с искусственной осушительной сетью в регионе Поозерья в северной части Республики Беларусь занимают более 600 тыс. га, из них около 70 % расположены на склонах (рис. 1).



*Рис. 1.* Эрозия почвы вследствие образования колеи вдоль склона местности при подкормке растений

Здесь преобладают дерново-подзолистые и дерновые глеевые, глееватые и слабogleеватые связные почвы, подстилаемые моренными суглинками. Для них характерны неоднородность почвенного покрова и степени увлажнения, сложность рельефа местности [1]. Так, для типичного случая на вершине пахотная почва может быть слабосмытой, дерново-подзолистой супесчаной на рыхлой песчанистой супеси, подстилаемой рыхлым мелкозернистым песком; на середине склона – осушенной, слабосмытой дерново-подзолистой глееватой супесчаной на слое моренного пылевато-песчаного суглинка с прослойками песка; в нижней части склона – дерново-глеевой, намытой связно-песчаной, с глубины 0,5 м – слой связной супеси и, наконец, у подножия склона – дерново-глееватой, намытой супесчаной на связной супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м мелко-

зернистым песком. Одной из причин водной эрозии почвы на пахотных землях является негативное воздействие машинно-тракторных агрегатов. При определенных условиях оно проявляется в виде глубоких колеи от колес тракторов и сельскохозяйственных машин, свальных и развальных борозд плугов, агротехнических борозд при междурядной обработке культиваторами пропашных культур – картофеля, кукурузы, сахарной свеклы. Помимо осушенных земель Поозерья, и в других регионах Беларуси имеются значительные пахотные площади на склонах 3–10 град. В среднем по республике они составляют 15 %, а в отдельных ее регионах – Витебской, Гродненской и Минской областях, расположенных на географических возвышенностях, – до 19–22 % всей пахотной площади (табл. 1, рис. 2) [1].

*Таблица 1*

**Распределение участков пашни  
по углу наклона рельефа**

Величина интервала, град.	Частотность, %, по областям						
	Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилевская	Республика Беларусь
	Угол наклона рельефа $\alpha$ , град.						
0–1	61,63	40,04	62,34	32,04	35,38	37,53	44,84
1–3	29,00	37,90	29,25	42,56	45,81	45,82	40,35
3–5	7,36	15,34	7,06	16,52	14,02	13,47	11,19
5–7	1,39	5,16	0,85	4,91	3,63	2,84	2,74
7–10	0,62	1,56	0,50	0,97	1,16	0,34	0,88

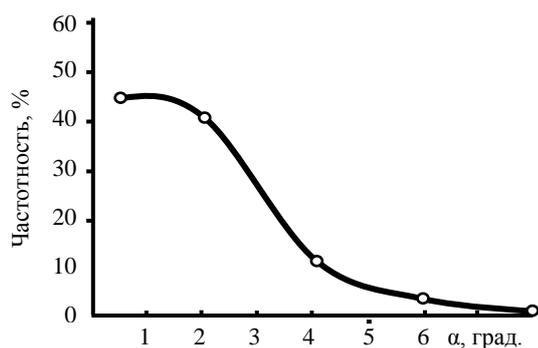


Рис. 2. Среднее распределение пахотных участков по углу наклона рельефа в Республике Беларусь

Кроме того, участки пахотных полей со сложной конфигурацией и короткой длиной гона до 300 м в республике составляют около 13 % всей площади, а в Витебской области, наиболее типичной по рельефу для региона Поозерья, — даже до 33 %.

Одним из видов эрозии почвы на пахотных землях является смыв плодородного слоя почвы на склонах в период весенних и осенних полевых работ, когда естественная влажность почвы достигает максимальных значений, а также в летние месяцы дождливых лет. Влажность обрабатываемого слоя почвы при этом может составлять 30–35 % у подножия склона и 10–15 % — у его вершины (рис. 3).

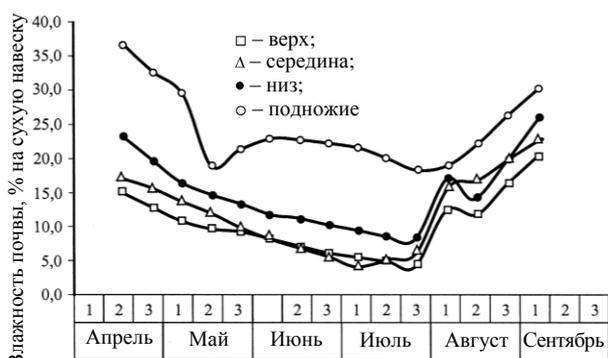


Рис. 3. Изменение сезонной влажности на различных элементах склонов [2]

Кроме того, как было указано выше, меняется и физико-механический состав почвы. Ее максимальная влажность наблюдается в весенний период — в апреле и начале мая, а также в осенний — в конце августа и сентябре. В это время при возделывании сельскохозяйственных культур выполняются различные виды операций применительно к конкретным культурам (табл. 2). Эти данные затем можно спроециро-

вать на график изменения влажности почвы в различное время года (рис. 3). Видно, что начало весенних и осенние полевые работы вынужденно проводятся в наиболее неблагоприятные по опасности водной эрозии периоды высокой влажности, особенно у подножия склонов.

Таблица 2

Примерные сроки возделывания сельскохозяйственных культур

Вид операции	Срок работ
Яровые	
Лущение стерни (8–10 см)	11.08–20.08
Зяблевая вспашка (20–22 см)	21.08–30.08
Ранневесенняя культивация с боронованием (10–12 см)	11.04–13.04
Внесение удобрений	16.04–20.04
Предпосевная культивация (8–10 см) с выравниванием и прикатыванием	16.04–20.04
Посев с внесением минеральных удобрений	16.04–20.04
Боронование всходов	11.05–15.05
Опрыскивание посевов (химпрополка)	11.05–15.05
Уборка комбайном	01.08–10.08
Подбор валков соломы с прессованием	01.08–10.08
Подбор тюков соломы	01.08–10.08
Картофель	
Лущение стерни	11.08–20.08
Внесение минеральных удобрений	11.09–15.09
Зяблевая вспашка	11.09–15.09
Культивация зяби	11.09–15.09
Ранневесенняя культивация	11.04–13.04
Внесение минеральных удобрений	16.04–20.04 и 26.04–30.04
Внесение органических удобрений	26.04–05.05
Запашка органических удобрений с боронованием	26.04–05.05
Предпосевная нарезка гребней	26.04–5.05
Посадка картофеля	26.04–5.05
Довсходовое рыхление	06.05–15.05
Довсходовое рыхление на 8–10 см	21.05–30.05
Окучивание с боронованием	01.06–10.06
Окучивание	21.06–30.06
Опрыскивание посевов	16.07–20.07 и 26.07–30.07
Удаление ботвы	11.09–30.09
Выкапывание клубней	16.09–5.10
Уборка комбайном	16.09–5.10

В таких разнообразных условиях воздействии ходовой системы колесных тракторов и сельскохозяйственных машин проявляется в двух аспектах – образовании глубокой колеи или недопустимом уплотнении почвы (рис. 4). Для условий развития водной эрозии почвы представляет интерес первый аспект. В этом случае возникновение на склоне глубокой колеи или борозд от рабочих орудий активизирует интенсивный сток воды, особенно если движение машинно-тракторного агрегата направлено не вдоль горизонталей склона, а поперек их. Такая траектория движения особенно характерна при подкормке злаковых культур широкозахватными сельскохозяйственными машинами или же междурядной обработке пропашных культур окучниками. Толщина наносов плодородного слоя у подножия склона может достигать 10–20 см на площади в десятки квадратных метров (рис. 5), что приводит их к выводу из севооборота на целый сезон и снижению общего объема продукции (рис. 6). Одновременно снижается урожайность сельскохозяйственных культур на вершине склона из-за истощения гумуса и влажности ниже оптимальной.



Рис. 4. Колея на склоне – причина последующей водной эрозии почвы

Таким образом, отклонение траектории движения машинно-тракторного агрегата от горизонталей местности является одной из основных причин развития водной эрозии почвы [3]. Ее вызывает высокая скорость стекания воды по склонам и складкам местности между ними, превышающая возможность ее поглощения почвой, особенно во время обильных дождей и снеготаяния в весенний период. Обычно со склонов стекает до 30 % осадков, которые, со-

бираясь в струйки и ручейки, перемещают вниз по склону мелкие глинистые частицы почвы, образуя ее поверхностный смыв, достигающий за год объема до 220 т с одного гектара. Это приводит к ухудшению плодородия используемых земельных угодий, особенно с маломощным почвенным горизонтом, равным на некоторых склонах всего 0,10–0,15 м, а также выводит из хозяйственного оборота значительные площади вследствие обнажения бесплодных слоев грунта.



Рис 5. Намыв почвы у подножия склона вследствие водной эрозии



Рис. 6. Деградированный водной эрозией участок поля у подножия склона (оценка размеров сетки трещин – по формату записной книжки 8×12 см)

Сток воды со склонов является и одной из причин постепенного уменьшения растворимых в почве питательных веществ. Это явление по своему негативному воздействию можно сравнить со срезанием пахотного слоя при мелиоративных работах. Например, срезание легкосуглинистой почвы на глубину 12 см приводит к ее уплотнению с 1,09 до 1,21 г/см<sup>3</sup>, снижению содержания гумуса на 58 %, азота, фосфора и калия – соответственно на 62,5; 36,7 и 44,0 %. Урожайность ячменя при этом может

снизиться от 10 до 50 % в зависимости от толщины срезаемого слоя [4]. По другим данным, красноземы, расположенные на склоне 0,245 рад., теряют за год в результате смыва гумуса в количестве, эквивалентном запасу питания на 21 год, что требует его систематического восстановления путем внесения органических и минеральных удобрений.

Одним из основных мероприятий по ослаблению водной эрозии почвы пахотных земель при их обработке на склонах является создание машинно-тракторных агрегатов с высокой курсовой устойчивостью вдоль горизонталей местности, исключая образование борозд, уклон которых превышает допустимый. Величина допустимого угла отклонения траектории движения агрегата от горизонталей местности определяется соотношением [3]

$$\sin \xi = \frac{\sin \mu}{\sin \alpha},$$

где  $\xi$  – угол отклонения траектории агрегата от горизонтали;  $\mu$  – уклон траектории;  $\alpha$  – угол склона (рис. 7).

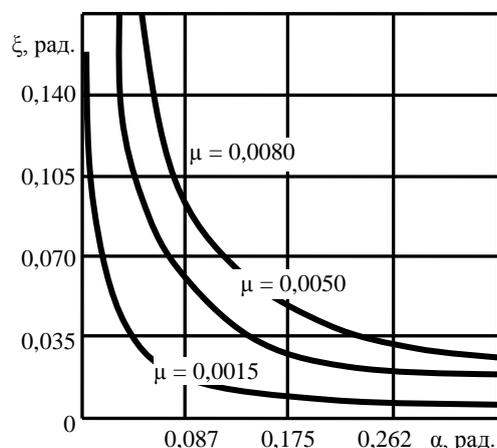


Рис. 7. Допустимые отклонения траектории агрегата от горизонтали местности в функции крутизны склона для различных допустимых уклонов траектории

Поверхностный смыв почвы с выносом частиц диаметром 0,0025 мм наблюдается уже при уклоне  $\operatorname{tg} \mu = 0,0050$ . Следовательно, отклонение траектории агрегата от горизонтали на 0,0175 рад на склоне 0,2600 рад. приводит к образованию борозд, уклон которых допускает появление эрозийных процессов почвы. Действительное же отклонение траектории движе-

ния агрегата на таком склоне значительно превышает указанную величину даже при стабилизации остова и ходовой части специального пропашного горно-равнинного трактора в вертикальной плоскости [3]. По другим данным, поверхностный размыв почвы начинается уже при уклоне 0,0015 и прекращается только при уклоне 0,0003. Для сравнения, в мелиоративных сетях в условиях высотных морено-озерных ландшафтов Поозерья уклон составляет 0,020–0,050, а низменных озерно-ледниковых – 0,002–0,010 [4]. Эти цифры дают ориентиры для жестких требований к траекторной точности курсового движения машинно-тракторного агрегата на склоне.

Движение трактора с перекосом его продольной оси к направлению движения и соответственно сельскохозяйственной машины на поперечном склоне, характеризуемое курсовыми углами, чревато также рядом других нежелательных последствий. При этом ухудшается агротехническая проходимость в междурядьях пропашных культур, нарушается технология выполняемого сельскохозяйственного процесса из-за изменения расстояний между образуемыми на поверхности поля рядками и кромками рабочих органов. В результате снижаются технико-экономические показатели машинно-тракторного агрегата вследствие возрастания сопротивления его движению и уменьшения ширины захвата.

В соответствии с требованиями механизированной междурядной обработки пропашных культур колеса трактора и рабочие органы машины не должны внедряться в защитные зоны культурных растений. Величину защитных зон определяют среднеквадратичные отклонения растений и траекторий рабочих органов машины, возрастающие с увеличением крутизны склона, а также конструкция рабочих органов, глубина обработки и вид выполняемой технологической операции. При культивации междурядий в равнинных условиях ширина защитных зон растений составляет 0,06–0,25 м в зависимости от конструкции и назначения почвообрабатывающих лап. Их положение в междурядьях является основой системы координат для отсчета углов отклонения продольной оси трактора и колес (рис. 8). Исходя из геометрических соотношений, допустимые значения курсового угла движения трактора

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{0,5C - S_3 - 0,5b_n \pm r_n \operatorname{tg}\Theta_1}{L + r_n + a_p},$$

где  $C$  – ширина междурядий;  $L$  – длина продольной базы трактора;  $a_p$  – расстояние лап от оси задних колес;  $S_3$  – защитная зона растений;  $b_n$  – ширина профиля шины;  $r_n$  – радиус передних колес;  $\Theta_1$  – корректирующий угол поворота переднего колеса для обеспечения заданного тракторного движения.

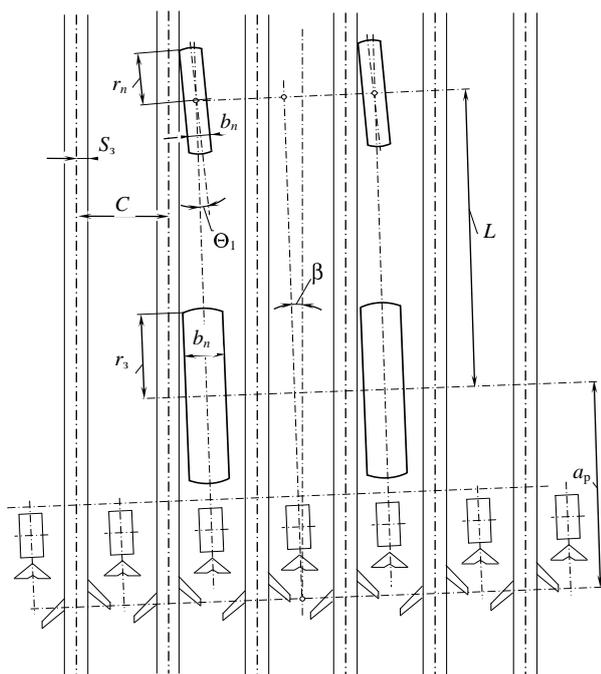


Рис. 8. Схема к определению допустимого курсового угла машинно-тракторного агрегата в междурядьях

Величина угла  $\Theta_1$  не должна превышать 0,027–0,017 и 0,046–0,036 рад. соответственно для междурядий 0,7 и 0,9 м. Приведенные допустимые углы «перекоса» трактора в агрегате с навесным культиватором в междурядье вычислены при условии абсолютно жесткой связи между ними. Однако в действительности навесная система трактора допускает некоторое поперечное смещение машины относительно остова вследствие выбора зазоров и упругостей под действием боковой составляющей от их веса. Это дополнительно ограничивает величину допустимого курсового угла движения трактора в функции крутизны склона исходя из требований защиты пахотного горизонта почвы от водной эрозии. Так, при максимальном склоне в 10 град. уклон траектории движения МТА не должен превышать 0,1, а отклонение

от горизонталей местности – 0,5 град. Устойчивое движение машинно-тракторного агрегата исходя из требований агротехники и противоэрозийной защиты на склонах до 0,262 рад. характеризует совокупность показателей в радианах не более: угол отклонения вектора скорости от горизонталей местности – 0,005–0,017; курсовой угол трактора – 0,017–0,027, машины – 0,015–0,028.

Показатели курсовой устойчивости являются функциями многих переменных: крутизны склона, физико-механических свойств грунта, давления воздуха в шинах нагрузки на колеса, распределения веса трактора между мостами и бортами колес, типа межосевых и межколесных связей, координат приложения крюкового усилия и его величины. Из этого множества факторов одними из основных являются остов и ходовая часть трактора в поперечной плоскости. По мере приближения трактора от нормального к вертикальному положению курсовой угол и угол отклонения траектории существенно улучшаются. Так, на склоне 0,26 рад. однолетней залежи их абсолютное значение уменьшается в 2,4 раза. Дополнительный эффект дает блокировка дифференциала за счет снижения буксования и связанного с этим бокового сдвига почвы, особенно на почве, подготовленной под посев сельскохозяйственных культур. Практика показывает, что зерновые, технические и масленичные культуры возделывают на склонах до 0,262 рад. при некоторой дифференциации по видам культур, например для сахарной свеклы – 0,123 рад., картофеля и кукурузы – 0,198 рад., кормовых – 0,245 рад. Предельный угол склона для сеяных трав составляет 0,85 рад. Этим цифрам соответствуют тысячи гектаров пахотной земли, подвергаемых водной эрозии.

Исходя из этого, необходимо создание специальных модификаций универсально-пропашных тракторов со стабилизацией остова в вертикальном положении для работы на склонах. В условиях Беларуси их реальный расчетный угол находится в пределах 10 град. (табл. 1, рис. 1). В этой области в республике накоплен значительный опыт научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Их результатом явилось создание в 1980-е гг. крутосклонной модификации универсально-пропашного трактора МТЗ-82К. Стабилизация его

остова в вертикальном положении при работе на склонах обеспечивается за счет дополнительных поворотных редукторов и системой их управления с гидравлическим приводом (рис. 9). Модернизированный вариант такого трактора, созданный в содружестве МТЗ и БНТУ, отличается от предшественника улучшенными характеристиками – унифицированной кабиной, сохранением продольной базы и колеи серийной модели трактора МТЗ-82. Они достигнуты путем новой схемы механизма стабилизации остова, в основу которой положен принцип перемещения нижнего по склону колеса при неподвижном колесе противоположного борта (рис. 10) [5]. Одновременно модернизирована навесная система трактора, обеспечивающая коррекцию навесной машины относительно поверхности склона (рис. 11). По сравнению с трактором МТЗ-82К улучшены такие параметры, как продольные база и габарит, а соответственно и минимальный радиус поворота, увеличены предел регулирования колеи задних колес и поперечный габарит жизненного пространства в кабине для водителя. По габаритам двоянные бортовые редукторы системы стаби-

лизации расположены (спрятаны) в ободьях задних колес, что не нарушает общий дизайн и сохраняет стандартную минимальную колею. Такой трактор может работать на равнине и склонах до 20 град., что для условий Беларуси даже является избыточным. Это повышает степень его универсальности по сравнению с серийной базовой моделью и позволяет применить к его названию термин «горно-равнинный» (табл. 3).

Следует отметить, что некоторое увеличение эксплуатационной массы обеих модификаций тракторов для работы на склонах по сравнению с серийной за счет дополнительных бортовых редукторов с приводом их поворота и механизма коррекции навесной системы обеспечивает повышенные тягово-сцепные показатели, необходимые для работы в условиях сложного рельефа местности. Курсовой угол трактора при стабилизации его остова и колес в вертикальном положении составляет на склоне 0,175–0,262 рад величину в 0,05–0,07 рад, что существенно меньше, чем у серийной модели без системы стабилизации (1 рад примерно равен 57,3 град.). Однако такая сложная за-

дача вождения по горизонталям местности для современных конструкций машинно-тракторных агрегатов и систем управления ими оператором в ручном режиме практически трудноразрешима. Поэтому сохраняется опасность ухудшения качества плодородного слоя почвы и даже вероятность его потери для сельскохозяйственного использования вследствие смыва гумуса и эрозии. Выполнение таких требований в перспективе возможно путем автоматического регулирования ширины захвата рабочего орудия в функции крутизны склона при максимальном его значении только на горизонтальной поверхности.

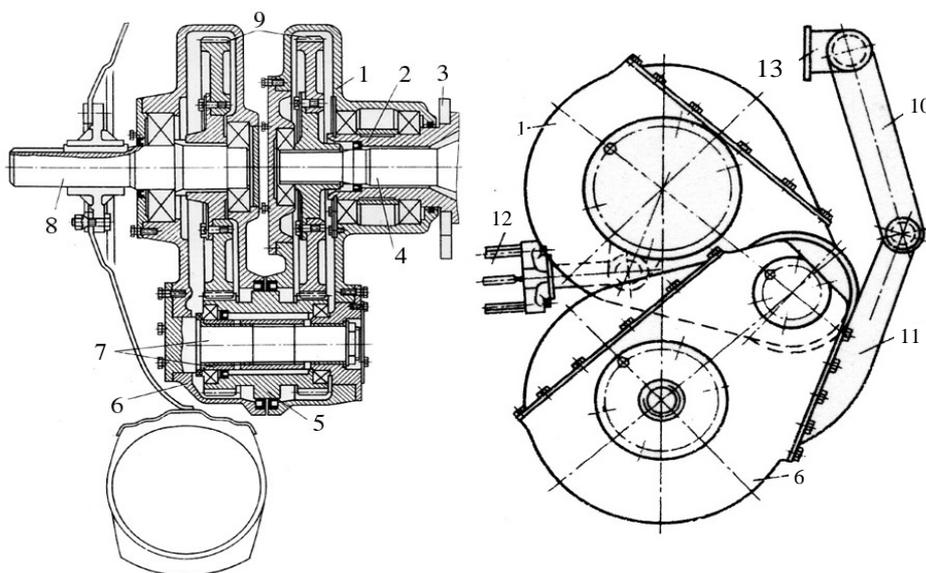


Рис. 9. Сдвоенный, раскладывающийся при стабилизации, редуктор горно-равнинной модификации трактора: 1 – первая часть редуктора, установленная на рукаве заднего моста с возможностью поворота силовым цилиндром; 2 – рукав заднего моста; 3 – фланец крепления рукава к корпусу заднего моста; 4 – ведущий вал редуктора; 5 – сдвоенная паразитная шестерня; 6 – вторая часть редуктора, поворотнo сочлененная с первой и кинематически связанная с остоном; 7 – цилиндрический шарнир сочленения частей редуктора; 8 – опорный вал со ступицей колеса; 9 – шестерни редуктора; 10 и 11 – тяга и рычаг кинематической связи второй части редуктора с остоном; 12 – силовый цилиндр; 13 – кронштейн присоединения тяги к остоном



Рис. 10. Горно-равнинная модификация трактора МТЗ-82 с унифицированной кабиной и передним мостом с изменяемой геометрией



Рис. 11. Горно-равнинный трактор с механизмами автоматической стабилизации остова в вертикальном положении и корректировки сельхозмашины параллельно поверхности поля на склоне

Таблица 3

**Характеристики инновационных модификаций трактора «Беларусь»**

Отличительные параметры	Модификация трактора МТЗ-82		
	Горно-равнинная	Круто-склонная	Серийная
Продольный габарит, м	4,06	4,45	4,00
Продольная база, м	2,45	2,90	2,45
Колея задних колес, м	1,40–2,10	1,60–2,10	1,40–2,10
Радиус поворота, м	4,30	4,70	4,10
Внутренний размер кабины, м	1,35 (серийная)	0,93 (специальная)	1,35
Масса эксплуатационная, кг	5140,00	5080,00	4050,00

Выбор и организацию способа движения МТА позволяет, например, известная программа AutoCAD. Для этого необходима соответствующая база данных: геометрический очерк и размеры полей на основе картограммы, ширина захвата агрегата и вид его движения, например «загонный», «безагонный» или «гоновый», с диагональным или круговым направлением, а также способ разворота агрегата для прямого и обратного хода. В сложных условиях на разворот затрачивается до 30–40 % сменного рабочего времени, что приводит к существенному снижению производительности. При моделировании процесса поворота на основании

принятой его схемы – «беспетлевой», «грушевидной» или «грибовидной» и их вариантов, а также наличия естественных препятствий и кинематической ширины агрегата определяется ширина поворотной полосы. Таким образом, на начальном этапе моделируется движение МТА, рассчитываются количество и направленность необходимых гонов.

В перспективе для исключения субъективного фактора при выборе оптимальной, с точки зрения противоэрозионной защиты траектории движения МТА на почвообрабатывающих операциях, необходима разработка системы под условным названием «Агронавигатор» через спутниковую связь по аналогии с автомобильными навигационными системами. Одновременно это будет способствовать улучшению технико-экономических и социальных показателей – снижению энергозатрат на передвижение без подъемов и спусков, сохранению плодородия почвы, улучшению условий труда водителя и безопасности его труда.

#### ВЫВОД

Большинство технологических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь выполняется в сложных природных условиях. Основными из них являются

ся рельеф местности со склонами до 10 град., неравномерная влажность по длине склона от вершины к подножию, достигающая трехкратных значений и меняющаяся в течение вегетационного периода развития растений, а также глубокая колея от ходовой системы машинно-тракторного агрегата и отклонение траектории его движения от горизонталей местности. Комбинированное воздействие всех этих факторов способствует развитию водной эрозии – смыву плодородного слоя почвы к подножию склона. Современные технологии сельскохозяйственного производства и конструкции машинно-тракторных агрегатов в определенных неблагоприятных условиях могут провоцировать развитие таких процессов. Для их минимизации необходимо внедрение инновационных технологий обработки почвы, направленных, прежде всего, на организацию движения машинно-тракторных агрегатов исключительно по горизонталям местности. Допустимое отклонение от них в зависимости от углов наклона местности в условиях полей Беларуси составляет 0,02–0,08 рад. Это предъявляет высокие требования к курсовой устойчивости трактора. Такими качествами обладают тракторы с автоматически изменяемой геометрией

ходовой системы, стабилизирующей в вертикальном положении. Предпосылки к их созданию обоснованы и апробированы на опытных образцах крутосклонной и горно-равнинной модификаций универсально-пропашных тракторов «Беларусь», которые предназначены для работы на полях со сложным рельефом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кринко, М. С.** Системный анализ эффективности скоростных тракторов в сложных полевых условиях / М. С. Кринко. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
2. **Водный** режим почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур на склоновых землях Поозерья / П. Ф. Тиво [и др.] // Мелиорация переувлажненных земель. – 2007. – № 2. – С. 92–98.
3. **Хачатрян, Х. А.** Стабильность работы почвообрабатывающих агрегатов / Х. А. Хачатрян. – М.: Машиностроение, 1974. – 206 с.
4. **Макоед, В. М.** Влияние рельефа мелиоративных объектов на формирование поверхностного стока в условиях белорусского Поозерья / В. М. Макоед, Г. В. Хмельская, О. Н. Куканова // Мелиорация. – 2012. – № 1 (67). – С. 50–60.
5. **Бортовой** редуктор крутосклонного транспортного средства: а. с. 918161 СССР / П. В. Зелёный, И. П. Ксеньевич, П. А. Амельченко, В. В. Гуськов, В. В. Яцкевич, В. Ф. Пронько, В. П. Зарецкий // Бюл. изобр. – 1982. – № 13.

Поступила 02.05.2013

УДК 661.882

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОМ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ТИТАНА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА

*Докт. техн. наук, доц. ПИЛИНЕВИЧ Л. П.<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. МАРЦУЛЬ В. Н.<sup>2)</sup>,  
асп. ЗАЛЕССКАЯ М. В.<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

<sup>2)</sup>Белорусский государственный технологический университет

Очистка воды от загрязнений, содержащих различные органические вещества и их соединения, вирусы и бактерии, – одна из основных проблем, стоящих перед мировым сообществом. Анализ методов очистки и обезврежива-

ния воды показал, что наиболее эффективным методом является очистка с помощью фотокатализатора на основе диоксида титана. Однако, несмотря на то что в последнее время опубликовано много работ, посвященных исследова-