

УДК 631.362.333:635.21:631.4-046.37

*А. Н. ОРДА<sup>1</sup>, В. Н. ДАШКОВ<sup>1</sup>, А. С. ВОРОБЕЙ<sup>2</sup>, И. А. ТАРАСЕВИЧ<sup>1</sup>*

## **ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПРИЛИПАЕМОСТИ ПОЧВЫ К КЛУБНЯМ КАРТОФЕЛЯ**

*<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет*

*<sup>2</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства*

*(Поступила в редакцию 13.12.2011)*

Беларусь входит в число стран с оптимальными для развития картофелеводства почвенно-климатическими условиями. По валовому сбору картофеля страна занимает восьмое место в мире, по производству в расчете на одного человека – первое.

В настоящее время проблема состоит не столько в том, как произвести картофель, а в том, как его реализовать с максимальной выгодой для производителя. Рыночные отношения предъявляют повышенные требования к качеству продаваемого картофеля, его товарному виду, упаковке. Отсортированный картофель с чистой кожурой без следов повреждений, уложенный в современные упаковочные материалы покупается по высокой цене, принося дополнительный доход производителю, пользуется повышенным спросом у оптовых покупателей.

Одной из наиболее трудоемких операций послеуборочной обработки картофеля и овощей, поступающих на стационарные сортировальные пункты или сортировально-очистительные линии после уборочных машин, является отделение от продукции комков почвы различной влажности, камней, растительных остатков и других примесей.

На поверхности клубней, особенно выращенных на тяжелых почвах, может содержаться прилипшая почва (осенью до 7–9%, весной до 4–5%). Надежный способ ее удаления – мойка клубней. Но она сложна в реализации, энергоемка, а также картофель перед продажей и закладкой на хранение мыть не рекомендуется, так как потом он плохо хранится из-за проявления различных болезней. Кроме того, смыть налипшую грязь с клубней одним лишь напором воды сложно, поэтому добавляются различные моющие средства, содержащие поверхностно-активные вещества, избавиться от которых можно лишь путем 10–15 полосканий. Это затратно для производителя и опасно для покупателя. Поэтому все большее внимание привлекает сухая очистка клубней.

Современные машины по возделыванию картофеля производят на почву высокое уплотняющее воздействие. При последующей обработке посевов крошение почвы сопровождается образованием мелких частиц, которые обладают высокой способностью прилипаемости к клубням картофеля. Оптимальная структура почвы состоит из комков размером 0,25–10 мм, такая почва меньше прилипает к клубням картофеля.

Эффективность работы устройств для сепарации почвоклубневого вороха при уборке и рабочих органов машин для предреализационной очистки товарного картофеля в значительной мере зависит от прилипаемости почвы к клубням. Это, в свою очередь, определяется применяемой технологией возделывания картофеля и свойствами почвогрунтов. Необходимо предложить обобщающий критерий оценки прилипаемости почвы к картофелю, применение которого позволит целенаправленно подходить к обоснованию рационального фракционного состава возделываемого горизонта, выбору технологических воздействий при обработке посевов и созданию благоприятных условий для последующей сепарации картофельного вороха и очистки клубней от загрязнений.

Применяя классические подходы земледельческой механики и теории уплотнения почвенного горизонта, сформулируем предпосылки образования слоя почвенных загрязнений на поверхности клубня картофеля.

Ходовые системы тракторов, агрегатируемых с машинами по возделыванию картофеля, создают давление на почву 100–150 кПа. Воздействие ходовых систем ведет к повышению плотности почвы на глубине до 0,5 м. Из-за этого не только ухудшаются условия роста картофеля, но и создаются предпосылки для увеличения прилипаемости почвы к клубням.

Анализ процесса поглощения энергии при уплотнении почвы позволил установить экспоненциальный закон распределения напряжений по глубине [1]:

$$\sigma_x = \sigma_0 e^{-\beta_1 x}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение в контакте почвы с колесом, Па;  $\sigma_x$  – напряжение на глубине  $x$ , Па;  $\beta_1$  – коэффициент распределения напряжений,  $\text{м}^{-1}$ .

Действующее в различных горизонтах почвы напряжения вызывают ее уплотнение:

$$\rho_x = \rho_n \left( 1 + \frac{\beta_1}{k} \sigma_0 e^{-\beta_1 x} \right), \quad (2)$$

где  $\rho_x$  – плотность почвы на глубине  $x$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_n$  – исходная плотность почвы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k$  – коэффициент объемного смятия почвы,  $\text{кН}/\text{м}^3$ .

Анализ зависимости (2) показал, что на глубине 0,1–0,3 м плотность почвы равна 1300–1400  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а оптимальная плотность составляет 1000–1200  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На прилипаемость почвы к клубням картофеля большое влияние оказывает пластичность, т. е. способность почвы изменять свою форму под влиянием внешней силы и сохранять приданную форму после устранения этой силы. Пластичность проявляется при увлажнении почвы и тесно связана с ее гранулометрическим составом (глинистые почвы пластичны, песчаные почвы не пластичны). При содержании в почве натрия ее пластичность усиливается, а при насыщении кальцием – снижается. Высокое содержание гумуса уменьшает пластичность почвы [2].

Диапазон влажности, при которой почва будет пластичной, характеризуется числом пластичности [2]:

$$j_p = w_L - w_p, \quad (3)$$

где  $w_L$  – граница влажности, при которой почва переходит в текучее состояние (верхний предел пластичности);  $w_p$  – граница раскатывания, соответствует влажности, при которой почва теряет свою пластичность (нижний предел пластичности).

Прилипаемость почвы к картофелю определяется ее липкостью, т. е. способностью ее частиц в сыром состоянии склеиваться и прилипать к поверхностям клубня. Склеивание твердых частиц почвы между собой и прилипание их к картофелю происходит посредством пленок воды и естественных цементов почвы (гумус, минеральные коллоиды и т. п.).

Липкость можно определить по формуле

$$\tau = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где  $\tau$  – липкость почвы, Па;  $F$  – усилие, затраченное на отрыв тела, прилипшего к почве, Н;  $S$  – площадь прилипания,  $\text{м}^2$ .

Липкость характерна для суглинистых, глинистых и отчасти пылеватых почв, находящихся в увлажненном состоянии. Размокание и пластичность почв приводят к потере прочности и увеличению липкости. Результаты определения липкости (рис. 1) показывают, что характерными показателями ее являются влажность начального прилипания, влажность максимального прилипания и максимальное значение липкости. На степень липкости грунта помимо влажности,

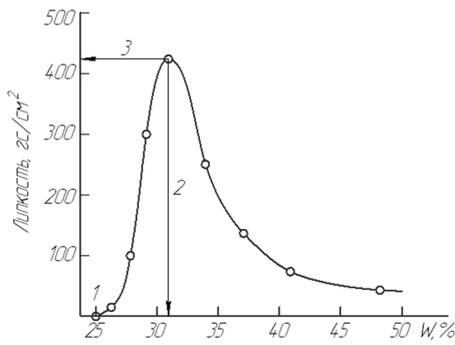


Рис. 1. График зависимости липкости глинистого грунта от влажности: 1 – влажность начального прилипания; 2 – влажность максимального прилипания; 3 – максимальная липкость грунта

вливают гранулометрический и химико-минералогический состав почвы, а также сила, с которой производится первоначальное придавливание почвы к клубню картофеля [3].

Липкость почвы обуславливается силами взаимодействия, возникающими между молекулами связанной воды и частицами почвы, с одной стороны, и молекулами воды и поверхностью соприкасающегося с почвой предмета – с другой. Она начинает проявляться при влажности, несколько превышающей влажность границы раскатывания. С дальнейшим увеличением влажности выше границы раскатывания липкость грунтов возрастает и достигает максимума при влажности, несколько меньшей границы текучести. При влажности выше границы текучести липкость грунтов резко уменьшается.

Сила трения  $T$  между почвой и соприкасающимся предметом равна [4]:

$$T = \mu_T (N + S_P), \quad (5)$$

где  $\mu_T$  – коэффициент внешнего трения;  $N$  – нормальная составляющая силы, Н;  $S$  – площадь соприкасающихся трущихся поверхностей, м<sup>2</sup>;  $P$  – давление прилипания, Па.

Из рис. 2 видно, что общее напряжение  $S$  имеет нормальную составляющую  $\sigma_n$  и напряжение сдвига  $\tau$ . При относительном перемещении предмета и почвы касательное напряжение стремится к установившемуся значению  $\tau_s$ , которое определяется по формуле [2]:

$$\tau_s = \alpha + \mu' \sigma_n, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – адгезия (сцепление частиц почвы с элементом), Па;  $\mu'$  – коэффициент трения между почвой и предметом.

Налипание почвы к поверхности происходит, когда вместо скольжения почвы по материалу в почвенном массиве образуются плоскости сдвига. Появление плоскостей сдвига зависит от соотношения между сопротивлением скольжению почвы по поверхности материала и внутренним сцеплением почвы. Сопротивление скольжению характеризуется величинами  $\alpha$  и  $\mu'$ , внутренняя прочность почвы – величинами  $c$  и  $\text{tg}\phi$  ( $c$  – когезия,  $\phi$  – угол внутреннего трения). При налипании тонкого почвенного слоя (рис. 3) скольжение почвы по предмету отсутствует, поэтому [2]:

$$\tau < \alpha + \mu' \sigma_n. \quad (7)$$

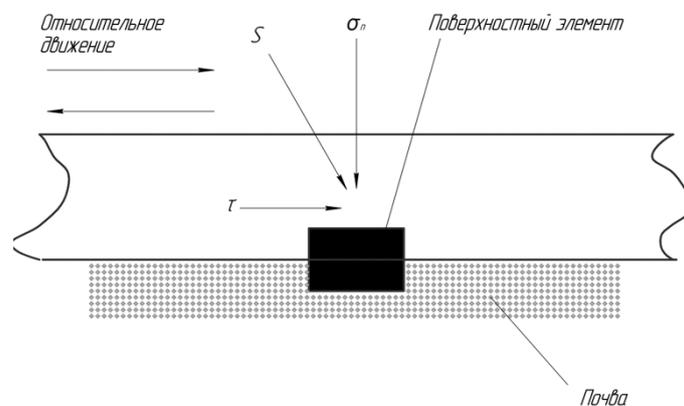


Рис. 2. Напряжения на поверхностном элементе почвы при скольжении по некоторому материалу

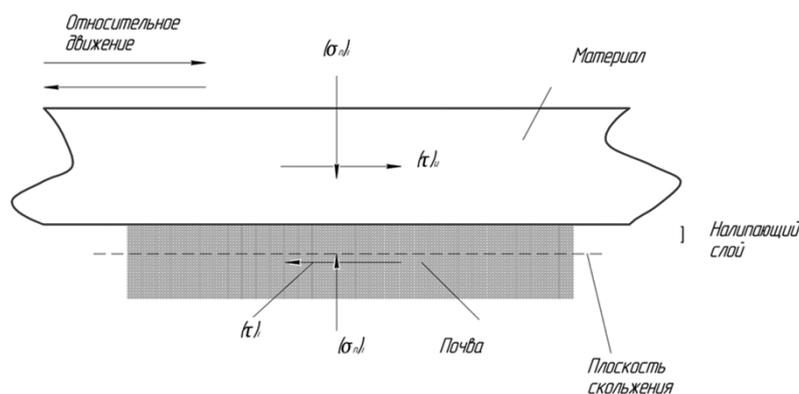


Рис. 3. Условия, благоприятствующие налипанию почвы

По закону Кулона на плоскости скольжения [2]:

$$\tau_i = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где  $c$  – когезия (сцепление частиц почвы между собой), Па;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент трения почвы.

На основе анализа зависимостей (7) и (8) в работе [2] показано, что налипание происходит при

$$\alpha + \mu' \sigma_n > c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi. \quad (9)$$

Таким образом, прилипание почвы к картофелю будет уменьшаться, если силы когезии (сцепление частиц почвы между собой) будут больше сил адгезии (сцепление частиц почвы с клубнем картофеля).

С ростом процентного содержания мелких частиц увеличивается прилипаемость почвы к клубням картофеля. Для исследования процесса крошения почвы в процессе обработки применим энергетический подход, согласно которому удельная поглощаемая энергия  $\psi_2$ , Дж/м<sup>3</sup>, равна [5]:

$$\psi_2 = \frac{1}{2} \beta_2 \rho_1 l v^2 e^{-\beta_2 l}, \quad (10)$$

где  $\beta_2$  – коэффициент поглощения энергии, м<sup>-1</sup>;  $\rho_1$  – плотность почвы в рассматриваемом объеме, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  – толщина обрабатываемого пласта почвы, м;  $v$  – скорость передвижения рабочего органа, м/с.

Величина критического значения поглощенной энергии, при которой происходит разрушение почвы равна:

$$P_\psi = 1 - \frac{1}{\exp\left(0,78 \frac{\psi^2}{\psi_{\text{ср}}^2}\right)}. \quad (11)$$

Величина  $P_\psi$  показывает, какая доля связей, имеющих в некотором элементарном объеме почвы, разрушится, если удельная поглощенная энергия будет равна  $\psi$ .

Зависимость критической поглощенной энергии  $P_\psi$  от плотности почвы  $\rho_1$  имеет следующий вид [5]:

$$P_\psi = 1 - \frac{1}{\exp\left(0,78 \frac{\alpha^2}{\psi_{\text{ср}}^2} \rho^2\right)}. \quad (12)$$

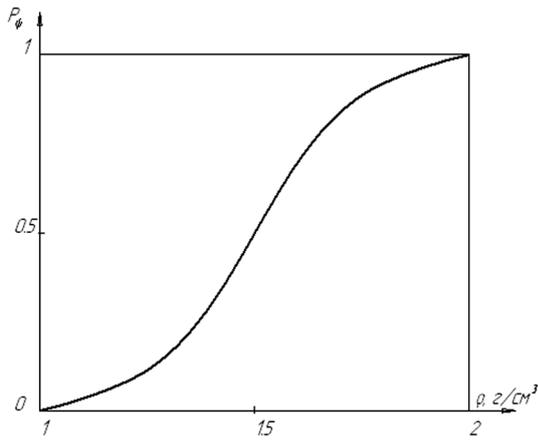


Рис. 4. Зависимость критического значения поглощенной энергии от плотности почвы

График изменения критического значения поглощенной энергии от плотности почвы, согласно указанной зависимости (12), представлен на рис. 4.

Для учета влияния фракционного состава на прилипаемость почвы воспользуемся методом ситового анализа взрыхленного торфа. На рис. 5 приведены кривые распределения, или частные характеристики крупности.

Практическое использование таких графиков затруднено, так как трудно сравнить результаты, полученные при исследовании различных образцов. При дальнейшей обработке результатов ситового анализа строятся графики суммарных массовых выходов частиц, размеры которых больше заданного. Линия, выражающая зависимость суммарного выхода от размеров частиц, называется

суммарной характеристикой. Суммарная характеристика может быть построена «по плюсу» или «по минусу». В первом случае по оси ординат откладывается процентное содержание частиц, диаметр которых больше некоторого заданного диаметра  $d$ , а в другом – меньше.

На рис. 6 приведена кривая распределения, суммарная характеристика «по плюсу» и суммарная характеристика «по минусу».

Для выравнивания кривых распределения по фракциям воспользуемся уравнением Розина и Раммлера (Розина–Раммлера), которое имеет следующий вид [6]:

$$P'(x) = 100nbx^{n-1}e^{-bx^n} \quad (13)$$

( $b$  и  $n$  – параметры уравнения).

Суммарная характеристика «по минусу» может быть найдена интегрированием уравнения (13) [6]:

$$P_1(x) = 100 - 100e^{-bd^n}, \quad (14)$$

суммарная характеристика «по плюсу»

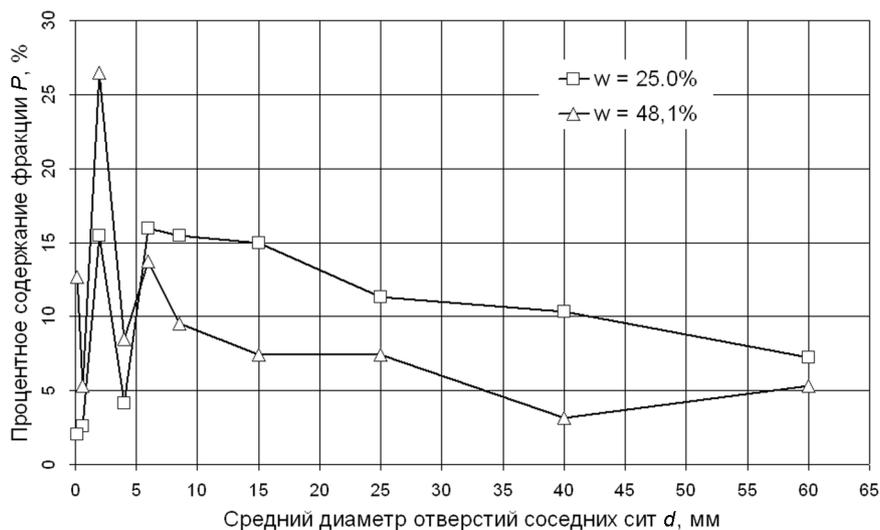


Рис. 5. Частные характеристики крупности частиц взрыхленного торфа

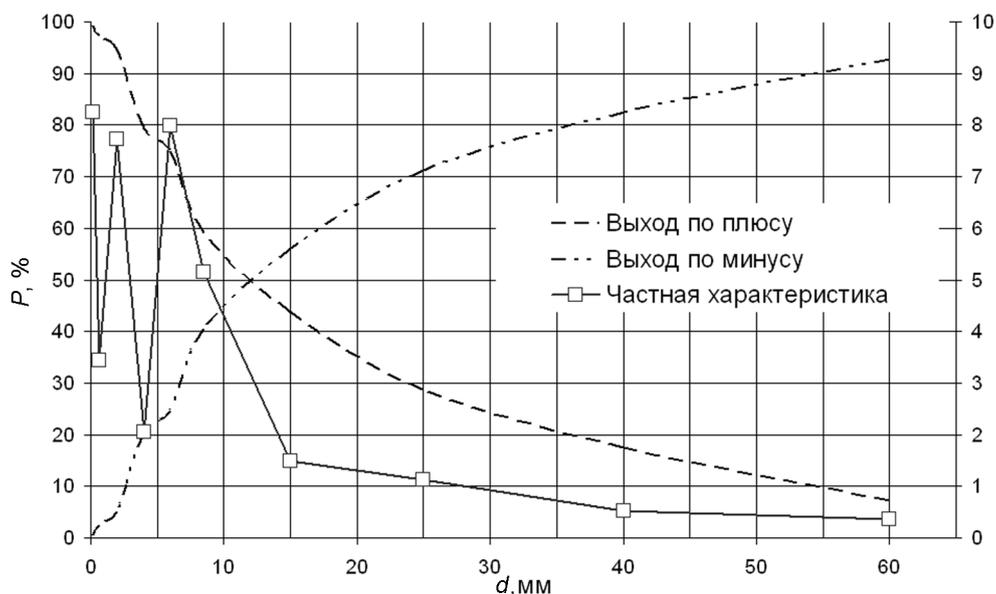


Рис. 6. Кривая распределения ( $w = 25,0\%$ ) и соответствующие ей выходы «по плюсу» и «по минусу»

$$P_1(x) = 100e^{-bd^n} \quad (15)$$

Здесь  $d = x$  – определяющий размер фракции.

Д. Биннета предложил заменить в формуле (15) параметр  $b$  на отношение  $1/d_e^n$ . Тогда формула суммарной характеристики по Розину–Раммлеру примет такой вид [6]:

$$R_s = 100e^{\left(\frac{d_q}{d_e}\right)^n}, \quad (16)$$

где  $n$  – показатель, характеризующий рассеяние частиц по крупности;  $d_q$  – текущий размер частиц;  $R_s$  – суммарный выход частиц крупнее размера  $x$ ;  $d_e$  – размер частиц, крупнее которого оказывается 36,8% материала.

Преобразовав формулу (16) и прологарифмировав ее дважды, получим:

$$\lg\left(\lg\frac{100}{P}\right) = n \lg d - n \lg d_e + \lg(\lg e).$$

Если обозначить  $\lg(\lg e) - n \lg d_e = c$ , то получим [6]:

$$\lg\left(\lg\frac{100}{P}\right) = n \lg d + c. \quad (17)$$

Из уравнения (17) видно, что в координатах  $[\lg(\lg 100/P), \lg d]$  уравнение Розина–Раммлера спрямляется. Показатель  $n$ , характеризующий рассеяние почвенных агрегатов по крупности, определяется как тангенс угла наклона прямой, а  $d_e$  – размер агрегатов, соответствующий выходу 36,8%.

На рис. 7 приведены зависимости суммарного выхода «по плюсу» торфа от среднего диаметра фракции  $d_q$  для разных значений его влажности. Значения  $n$  для влажности 25,0% равно 1,04; для влажности 48,0% – 0,95. Значения  $d_e$  составляют 20,77 и 11,03 мм соответственно.

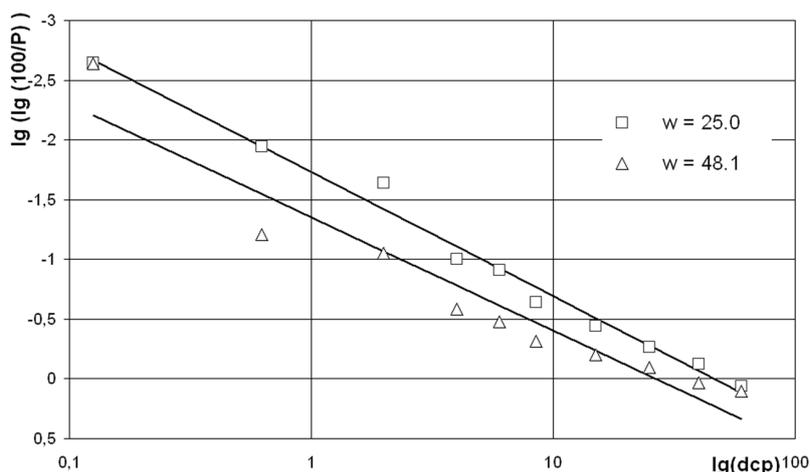


Рис. 7. Зависимость суммарного выхода «по плюсу»  $P$  от среднего диаметра фракций  $d$  в логарифмических координатах (для данных, представленных на рис. 6)

С помощью параметров  $n$  и  $d_e$  можно характеризовать фракционный состав почвы.

Из физики почвы известно [7], что оптимальной структурой обладает почва, размеры фракций которой составляют от 0,25 до 7 мм. Для фракционного анализа применяют колонки из сит с отверстиями 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0 мм. Проанализируем, чему равны параметры уравнения Розина–Раммлера для почвы оптимальной структуры, при этом допустим, что частные характеристики крупности подчиняются нормальному распределению:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_u)^2}{2\sigma_u^2}}, \quad (18)$$

где  $m_u$  – математическое ожидание;  $\sigma_u$  – дисперсия.

Если принять, что  $m_u = m_{cp} = 7/2 = 3,5$  мм, то получим следующий процентный выход фракций в интервалах, соответствующих размерам сит (таблица).

#### Выход фракций, %

| Дисперсия        | Интервал, мм |          |       |      |       |       |       |
|------------------|--------------|----------|-------|------|-------|-------|-------|
|                  | 0–0,25       | 0,25–0,5 | 0,5–1 | 1–2  | 2–3   | 3–5   | 5–7   |
| $\sigma_u = 0,8$ | 0,002        | 0,006    | 0,08  | 2,95 | 23,56 | 70,36 | 3,04  |
| $\sigma_u = 1$   | 0,03         | 0,08     | 0,49  | 6,06 | 24,17 | 62,47 | 6,66  |
| $\sigma_u = 1,2$ | 0,16         | 0,28     | 1,24  | 8,7  | 23,28 | 55,59 | 10,38 |

Расчеты по определению параметров уравнения Розина–Раммлера для почвы оптимальной структуры показали, что параметры уравнения Розина–Раммлера для почвы оптимальной структуры имеют следующие значения:  $n = 2-4$ ;  $d_e = 5-6$  мм. При исследовании процесса крошения почвы окучивающим корпусом получено, что размер частиц  $d_e = 12,0-23,0$  мм, а показатель, характеризующий рассеяние почвенных агрегатов по крупности,  $n = 0,76-0,81$  [8].

Таким образом, традиционная обработка почвы под картофель не обеспечивает сохранение оптимальной структуры почвы. Параметры уравнения Розина–Раммлера для почвы в процессе обработки значительно отличаются от параметров почвы оптимальной структуры.

#### Выводы

1. На прилипаемость почвы к картофелю оказывает влияние давление ходовых систем и физико-механические свойства почвы. Уплотненная почва при последующей традиционной обработке обладает неудовлетворительным фракционным составом, в котором преобладают мелкие частицы. Повышение дисперсности почвы ведет к повышению прилипаемости к клубням картофеля.

2. В качестве критериев оценки прилипаемости почвы к картофелю предлагается использовать параметры уравнения Розина–Раммлера. Для почвы оптимального фракционного состава параметры уравнения Розина–Раммлера имеют следующие значения: показатель однородности частиц  $n = 2-4$ , показатель крупности  $d_e = 5-6$  мм. Для традиционных технологий почвообработки при возделывании картофеля фракционный состав почвы характеризуется следующими значениями параметров уравнения Розина–Раммлера:  $n = 0,7-0,8$ ;  $d_e = 12-23$  мм.

3. Так как при уменьшении показателя однородности частиц уравнения Розина–Раммлера  $n$  увеличивается процентное содержание мелких частиц, а следовательно, и прилипаемость почвы к картофелю, обоснование рационального фракционного состава возделываемого горизонта по этому критерию, путем целенаправленного выбора технологических воздействий при обработке посевов, позволит создать благоприятные условия для последующей сепарации картофельного вороха и качественной очистки клубней от загрязнений.

### Литература

1. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А. Н. Орда ЦНИИМЭСХ. – Минск, 1997. – 269 л.
2. Кулен, А. Современная земледельческая механика /А. Кулен, Х. Куиперс. – М.: Агропромиздат, 1986. – 349 с.
3. Бабков В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В. Ф. Бабков, В. М. Безрук. – М., 1976. – 327 с.
4. Лиштван И. И. Физические свойства торфа и торфяных залежей / И. И. Лиштван, Е. Т. Базин, В. И. Косов. – Минск: Наука и техника, 1985. – 239 с.
5. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В. В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной техники. – Минск, 1964. – Т. 13. – С. 5–147.
6. Кислов, Н. В. Аэродинамика измельченного торфа / Н. В. Кислов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 174 с.
7. Ревут, И. Б. Физика почв / И. Б. Ревут. – Л.: Колос, 1972. – 387 с.
8. Дмитриев, А. М. К вопросу крошения почвы рабочими органами // А. М. Дмитриев, Н. И. Бохан // Труды ЦНИИМЭСХ. – Т. 7. – Минск, 1969. – С. 24–30.

*A. N. ORDA, V. N. DASHKOV, A. S. VOROBAY, I. A. TARASEVICH*

### SUBSTANTIATION OF THE ASSESSMENT CRITERIA OF SOIL ADHESION TO POTATO TUBERS

### Summary

The author of the article considers some theoretical aspects of influence of potato cultivation technology and soil characteristics on soil adhesion to tubers as major factors, determining operating efficiency of pile separation devices and tools of a machine for pre-sale potato cleansing. The assessment criterion of soil adhesion to potatoes on the basis of the Rozin-Rammler equation parameters is suggested. It will allow to substantiate the required fractional structure of a soil layer and a choice of technological operations in the process of soil cultivation.