

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ С УЧЕТОМ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ХОДОВЫХ СИСТЕМ МТА НА ПОЧВУ

А.Н. Орда,

зав. каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В.А. Шкляревич,

ст. преподаватель каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ

Н.Л. Ракова,

доцент каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.Г. Вабищевич,

доцент каф. инженерной графики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье обоснована и разработана методика расчета урожайности сельскохозяйственных культур для различных технологий возделывания с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на почву. Согласно предложенной методике, приведен пример расчета урожайности пшеницы, возделываемой по технологиям с традиционной и минимальной обработкой почвы.

Ключевые слова: технология возделывания, урожайность, переуплотнение почвы, плотность почвы, количество проходов по одному следу, площадь участка поля, пшеница.

The methodology for calculating crop yields for various cultivation technologies taking into account the compacting effect of the running systems of machine-tractor units on the soil is justified and developed in the article. According to the proposed method, an example of the calculation of wheat yields cultivated according to traditional and minimal technologies is given.

Keywords: cultivation technology, yield, overconsolidation, soil density, number of passes on the same trail, parcel size, wheat.

Введение

Применяемые в настоящее время интенсивные технологии земледелия в растениеводстве позволяют, с одной стороны, получать высокие урожаи сельскохозяйственных культур, а с другой – ведут к деградации земель сельскохозяйственного назначения – процессу, снижающему продуктивность и плодородие почвы в результате ухудшения ее свойств в сравнении с их оптимальными значениями. Одной из основных причин деградации сельскохозяйственных земель в условиях ведения интенсивного земледелия, при котором значительно усиливается воздействие на почву ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА), является ее переуплотнение. Чрезмерное уплотнение почвы, происходящее под воздействием ходовых систем тяжелых мощных тракторов и сельскохозяйственных машин, стало серьезной угрозой плодородию, приводит к нарушению ее структуры, и является одной из причин развития эрозионных процессов. Так, плотность пахотных слоев почвы под воздействием ходовых систем машинно-тракторных

агрегатов возрастает до 1500 кг/м^3 [1], в то время как оптимальная плотность для возделывания сельскохозяйственных культур составляет $1000\text{-}1300 \text{ кг/м}^3$ [2, 3]. Плотность подпахотных слоев почвы достигает величины 1700 кг/м^3 , близкой к критической [1, 4].

Чрезмерное уплотнение почвы приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур в среднем на 5-20 %, а в редких случаях и более [5, 6], повышению затрат энергии и расхода топлива, уменьшению производительности [7].

Цель данного исследования – обосновать и разработать методику расчета урожайности сельскохозяйственных культур для различных технологий возделывания с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на почву.

Основная часть

Урожайность сельскохозяйственной культуры является важнейшим критерием оценки целесообразности выбора и использования той, либо иной технологии ее возделывания. Технологические операции, связанные с обработкой почвы, – основные операции

производственного процесса возделывания сельскохозяйственной культуры. От количества и качества выполнения операций по обработке почвы зависит будущий урожай. Обработка почвы – механическое воздействие на почву рабочими органами почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов, способствующее созданию оптимальных условий для роста и развития возделываемых сельскохозяйственных культур. Переуплотнение почвы и разрушение ее структуры ходовыми системами и рабочими органами почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов – основные причины снижения урожайности сельскохозяйственных культур, ухудшения условий обработки почвы и повышения затрат на производство продукции растениеводства.

В целом все разнообразие путей и способов снижения чрезмерного уплотняющего воздействия ходовых систем МТА на почву можно условно разделить на три группы: технологические, конструктивные и агротехнические.

Технологические способы борьбы с переуплотнением почвы заключаются в уменьшении количества механических воздействий, глубины обработки и совмещении нескольких технологических операций. Так, к данному способу относятся: технологии возделывания, при которых площадь уплотненной поверхности поля минимальна; применение комбинирован-

ных широкозахватных агрегатов; внедрение в сельскохозяйственное производство мостового земледелия, секционных мобильных энергетических средств и модульного агрегатирования; использование агрегатов с рабочими органами-двигателями. То есть технологические способы борьбы с переуплотнением почвы напрямую связаны с технологией возделывания сельскохозяйственных культур и со способами ее обработки.

Применяются несколько общепризнанных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, включающих различные способы обработки почвы: традиционная максимально развернутая; безотвальная; минимальная и нулевая (рис. 1).

Являясь частью технологии возделывания, минимальная обработка почвы заключается в том, что культуры выращиваются с меньшим количеством операций по обработке почвы в сравнении с традиционной максимально развернутой технологией [8]. Термин «минимальная обработка» (*minimum tillage*) носит обобщающий характер. Это понятие включает в себя все виды почвозащитной обработки за исключением нулевой.

Минимальной технологии обработки почвы в полной мере соответствуют получившие в наши дни повсеместное распространение комбинированные широкозахватные почвообрабатывающие и посевные агрегаты.

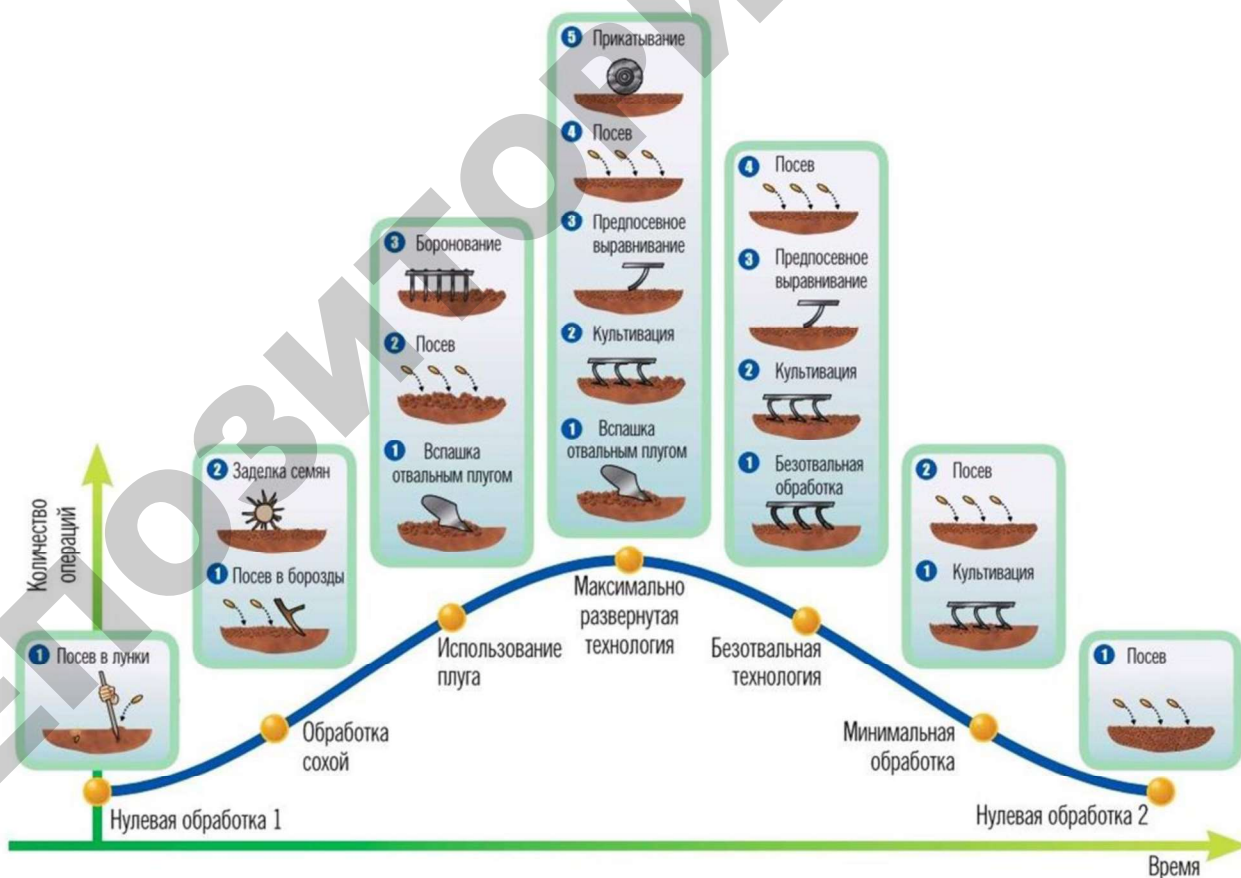


Рисунок 1. Историческое развитие способов обработки почвы [8]

Как уже отмечалось, плотность почвы является одним из важнейших факторов получения высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Использование той, либо иной технологии возделывания определяет интенсивность воздействия ходовых систем МТА на почву. За период времени от подготовки почвы до уборки урожая разнообразные машины проходят по полю от 5 до 15 раз, а иногда и более. Суммарная площадь следов ходовых систем нередко вдвое превышает площадь поля, а на поворотных полосах – в 6-20 раз [9].

На основании взаимосвязи элементов системы «урожайность – плотность почвы» (рис. 2) предложена методика расчета урожайности сельскохозяйственных культур, возделываемых по различным технологиям, с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем МТА на почву. Согласно методике, вначале производится расчет степени уплотнения верхнего слоя почвы при многократных проходах по ней ходовых систем МТА по следующей зависимости [10]:

$$\left(\frac{\rho_n}{\rho_0}\right) = 1 + \frac{\beta}{k} \left[p_0 \operatorname{th} \left(\operatorname{arch} \frac{n \frac{B_1 k}{\rho_0^2}}{1 - \frac{\sigma_0^2}{\rho_0^2}} \right) + k_i \sigma_0 \lg n \right], \quad (1)$$

где ρ_n – плотность почвы после уплотнения, кг/м³;

ρ_0 – плотность верхнего слоя почвы до нагружения, кг/м³;

β – коэффициент распределения напряжений в почве, м⁻¹;

k – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³;

p_0 – предел несущей способности почвы, Па;

B_1 – коэффициент накопления повторных осадок почвы, кН/м;

σ_0 – напряжение в почве в пятне контакта под движителем, Па;

k_i – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации;

n – количество уплотняющих воздействий на почву (число повторных проходов ходовых систем по одному следу).

Плотность поверхностного слоя почвы после многократного уплотнения ее ходовыми системами МТА [10]:

$$\rho_n = \rho_0 \left(\frac{\rho_n}{\rho_0}\right). \quad (2)$$

Затем, в зависимости от используемой технологии возделывания, определяется кратность уплотняющих воздействий почвы ходовыми системами МТА. Рассчитываются площади участков поля, подверг-

шихся n -кратному числу повторных проходов ходовых систем МТА по одному следу.

Урожайность сельскохозяйственной культуры, получаемая после n -го количества уплотнений почвы с рыхлым верхним (пахотным) слоем и плотным нижним подстилающим основанием (плужной по- дошвой), определяется согласно зависимости [11]:



Рисунок 2. Взаимосвязь элементов системы «урожайность – плотность почвы»

$$Y_n = Y_{\max} \left[1 - \left(c_{\text{п}} (\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{опт}}) \right)^n + \left(c_{\text{пп}} (\rho_{\text{ппс}} - \rho_{\text{опт}}) \right)^n \right], \quad (3)$$

где Y_{\max} – максимальная урожайность сельскохозяйственной культуры, получаемая при обеспечении оптимальных условий для ее возделывания;

$c_{\text{п}}$ – почвенный коэффициент для пахотного слоя почвы, м³/кг;

$c_{\text{пп}}$ – почвенный коэффициент для подпахотного слоя почвы, м³/кг;

$\rho_{\text{пс}}$ – плотность пахотного слоя почвы, кг/м³;

$\rho_{\text{ппс}}$ – плотность подпахотного слоя почвы, кг/м³;

$\rho_{\text{опт}}$ – оптимальная плотность почвы для возделывания сельскохозяйственной культуры, кг/м³.

Расчет урожайности сельскохозяйственной культуры, получаемой после n -го количества уплотнений почвы с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами, например, стерни, производится по зависимости [11]:

$$Y_n = Y_{\max} \left(1 - c_{\text{ср}} (\rho_{\text{ср}} - \rho_{\text{опт}}) \right)^n, \quad (4)$$

где $c_{\text{ср}}$ – почвенный коэффициент слоя почвы 0-40 см, м³/кг;

$\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность слоя почвы 0-40 см, кг/м³.

Используя полученные данные по площадям участков поля, подвергшихся различной степени уплотняющего воздействия, и урожайности на них, определяется средневзвешенная урожайность сельскохозяйственной культуры, возделываемой по используемой технологии.

В качестве примера, согласно предложенной методике, рассчитаем и сравним урожайность пшеницы, возделываемой на дерново-подзолистой суглинистой

почве по технологиям с традиционной максимально развернутой и минимальной обработки почвы, с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на почву.

Принимаем, что при возделывании пшеницы по традиционной технологии образуются участки поля, на которых число повторных проходов ходовых систем МТА по одному следу равняется 15 (поворотные полосы), т. е. $n = 15$. Часть поверхности поля подвергается десятикратному уплотнению ($n = 10$), часть – пятикратному ($n = 5$), а оставшаяся – не уплотняется ходовыми системами.

При использовании технологии возделывания пшеницы с минимальной обработкой почвы, при которой количество технологических операций значительно меньше в сравнении с традиционной, считаем, что некоторые участки поля подвергаются только пятикратному уплотнению ходовыми системами МТА ($n = 5$), оставшаяся площадь поля не уплотняется.

После подстановки значений величин и коэффициентов, входящих в зависимость (1), степень уплотнения дерново-подзолистой суглинистой почвы ($\beta = 3 \text{ м}^{-1}$; $k = 1500 \text{ кН/м}^2$; $p_0 = 400 \text{ кПа}$; $B_1 = 1,3 \text{ кН/м}$ и $k_n = 0,22$ при $n = 15$; $B_1 = 1,1 \text{ кН/м}$ и $k_n = 0,19$ при $n = 10$; $B_1 = 0,8 \text{ кН/м}$ и $k_n = 0,16$ при $n = 5$ [10]) при среднем значении $\sigma_0 = 100 \text{ кПа}$ для всех технологических операций, связанных с уплотняющим воздействием ходовых систем МТА на почву, при $n = 15$: $(\rho_n/\rho_0)_{15} = 1,39$, при $n = 10$: $(\rho_n/\rho_0)_{10} = 1,36$, при $n = 5$: $(\rho_n/\rho_0)_5 = 1,32$. То есть плотность почвы после 15 повторных проходов по ней ходовых систем МТА увеличилась в 1,39 раза, после 10 – в 1,36 раза, а после 5 – в 1,32 раза.

Согласно источникам [2, 3], оптимальная плотность ($\rho_{\text{опт}}$) дерново-подзолистых суглинистых почв для возделывания пшеницы находится в диапазоне 1100–1300 кг/м^3 (принимаем $\rho_{\text{опт}} = 1200 \text{ кг/м}^3$). Следовательно, согласно зависимости (2), при оптимальной плотности поверхностного слоя почвы и $n = 15$: $\rho_n = 1200 \cdot 1,39 = 1667 \text{ кг/м}^3$; при $n = 10$: $\rho_n = 1200 \cdot 1,36 = 1632 \text{ кг/м}^3$, а при $n = 5$: $\rho_n = 1200 \cdot 1,32 = 1584 \text{ кг/м}^3$.

Далее при расчетах площадей участков поля, подвергшихся различной степени уплотняющего воздействия, и урожайности пшеницы на этих участках используем соответственно индекс «1» для традиционной технологии возделывания и индекс «2» для технологии с минимальной обработкой почвы.

Известно, что при традиционной максимально развернутой технологии возделывания сельскохозяйственных культур, в среднем 10–12 % площади поля подвергаются воздействию движителей от 6 до 20 раз, 65–85 % – от 1 до 6 раз и только 10–15 % не уплотняются машинами [12, 13].

Примем площадь поля (A) под пшеницу, равную 50 га. Согласно приведенным данным, рассчитываем площади участков поля, n -кратно уплотненные ходовыми системами МТА. Тогда при $n = 15$: $A_{15}^1 = 0,05 \cdot A =$

$$= 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ га}; \text{ при } n = 10: A_{10}^1 = 0,05 \cdot A = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ га}; \text{ при } n = 5: A_5^1 = 0,75 \cdot A = 0,75 \cdot 50 = 37,5 \text{ га}; \text{ площадь поля, не подвергшаяся уплотнению: } A_0^1 = 0,15 \cdot A = 0,15 \cdot 50 = 7,5 \text{ га.}$$

При использовании технологии с минимальной обработкой почвы при возделывании сельскохозяйственных культур площадь следов в среднем не превышает 15 % площади поля [12, 13]. То есть площадь поля, подвергшаяся 5-кратному уплотнению, в нашем случае составляет: $A_5^2 = 0,15 \cdot A = 0,15 \cdot 50 = 7,5 \text{ га}$. Площадь поля, которая не уплотняется под воздействием ходовых систем МТА: $A_0^2 = 0,85 \cdot A = 0,85 \cdot 50 = 42,5 \text{ га}$.

Несмотря на то, что в нынешних условиях производства продукции растениеводства урожайность высокопродуктивных сортов пшеницы при условии строгого соблюдения технологии ее возделывания достигает 100 и более центнеров с гектара, для реалистичности расчетов принимаем в качестве максимальной среднюю урожайность пшеницы по республике за 2018 год – $Y_{\text{max}} = 27,5 \text{ ц/га}$ [14].

Так как в результате возделывания пшеницы по рассматриваемым технологиям в почве образуются рыхлый верхний слой и плотное нижнее подстилающее основание, расчеты урожайности проводим по зависимости (3). Значения коэффициентов, входящих в зависимость (3), принимаем равными: $c_n = 0,002 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{пл}} = 0,0012 \text{ кг/м}^3$ при $n = 15$; $c_n = 0,0019 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{пл}} = 0,0011 \text{ кг/м}^3$ при $n = 10$; $c_n = 0,0015 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{пл}} = 0,0009 \text{ кг/м}^3$ при $n = 5$ [11]. Плотность подпахотного слоя почвы $\rho_{\text{плс}} = 1700 \text{ кг/м}^3$ [1, 4].

Так, урожайность пшеницы в следах ходовых систем МТА после 15 повторных проходов: $Y_{15} = 17,8 \text{ ц/га}$; после 10 – 23,8 ц/га ; после 5 – 25,1 ц/га .

Используя полученные выше данные по площадям участков поля, подвергшихся различной степени уплотняющего воздействия, и урожайности на них, найдем средневзвешенную урожайность пшеницы, возделываемой по обеим технологиям, с учетом уплотнения поверхности поля ходовыми системами МТА.

При использовании традиционной максимально развернутой технологии возделывания, урожайность пшеницы с учетом уплотнения поверхности поля ходовыми системами МТА составит:

$$Y^1 = \frac{Y_{15}^1 A_{15}^1 + Y_{10}^1 A_{10}^1 + Y_5^1 A_5^1 + Y_0^1 A_0^1}{A_{15}^1 + A_{10}^1 + A_5^1 + A_0^1} = \frac{17,8 \cdot 2,5 + 23,8 \cdot 2,5 + 25,1 \cdot 37,5 + 27,5 \cdot 5,5}{2,5 + 2,5 + 37,5 + 7,5} = 25,0 \text{ ц/га.} \quad (5)$$

При возделывании пшеницы по технологии с минимальной обработкой почвы с учетом уплотнения

поверхности поля ходовыми системами МТА урожайность пшеницы составит:

$$y^2 = \frac{Y_5 A_5^2 + Y_0 A_0^2}{A_5^2 + A_0^2} = \frac{25,1 \cdot 7,5 + 27,5 \cdot 42,5}{7,5 + 42,5} = 27,1 \text{ ц/га.} \quad (6)$$

Расчеты урожайности по зависимостям (5) и (6) показывают, что применение технологии возделывания пшеницы с минимальной обработкой почвы в сравнении с традиционной максимально развернутой позволяет уменьшить потери ее урожайности на 2,1 ц/га за счет сокращения количества уплотняющих воздействий ходовых систем МТА на почву. В масштабах республики прирост урожайности пшеницы на 2,1 ц/га, возделываемой по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь [14] в 2018 году на 11,5 % (270 тыс. га) посевных площадей зерновых и зернобобовых культур (2 348 тыс. га), прибавил бы к ее валовому сбору:

$$0,21 \text{ т/га} \cdot 270 \text{ 000 га} = 56 \text{ 700 т.}$$

Заключение

Урожайность сельскохозяйственных культур является важнейшим критерием оценки целесообразности выбора и использования той или иной технологии возделывания. Выбор технологии возделывания определяет интенсивность воздействия ходовых систем МТА на почву. Оптимальная плотность почвы является одним из главных факторов получения высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Поэтому использование технологий возделывания, обеспечивающих снижение количества и интенсивности уплотняющих воздействий ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на почву, – важный резерв повышения урожайности сельскохозяйственных культур и эффективности производства продукции растениеводства в целом.

На основании взаимосвязи элементов системы «урожайность – плотность почвы» обоснована и разработана методика расчета урожайности сельскохозяйственных культур для различных технологий возделывания с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на почву.

Согласно предложенной методике, приведен пример расчета урожайности пшеницы, который показывает, что использование технологии с минимальной обработкой почвы в сравнении с традиционной, максимально развернутой, только за счет сокращения количества уплотняющих воздействий ходовых систем МТА на почву позволяет уменьшить потери ее урожайности на 2,1 ц/га.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасьев, Н.И. Основные проблемы физики дерново-подзолистых почв БССР и пути их решения / Н.И. Афанасьев // Почвоведение. – 1990 – № 5. – С. 128-138.
2. Роль оптимизации физических свойств почв Белоруссии в повышении урожайности сельскохозяйственных культур / Н.И. Афанасьев [и др.]; под общ. ред. Н.И. Афанасьева. – Минск : БелНИИТИ, 1985. – 35 с.
3. Шейн, Е.В. Агрофизика / Е.В. Шейн, В.М. Гончаров. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 400 с.
4. Орда, А.Н. Определение показателей уплотняющего воздействия на почву ходовых систем колесных тракторов / А.Н. Орда, В.А. Шкляревич, А.С. Воробей // Агропанорама. – 2016. – № 3. – С. 6-12.
5. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев: Урожай, 1989. – 144 с.
6. Белов, Г.Д. Уплотнение почвы и урожайность зерновых / Г.Д. Белов, А.П. Подолько. – Минск: Ураджай, 1985. – 64 с.
7. Севернев, М.М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М.М. Севернев. – Минск: Ураджай, 1994. – 222 с.
8. Шпаковский, Н.А. Эволюция технологий обработки почвы / Н.А. Шпаковский // Триз-профи: эффективные решения. – 2007. – № 2. – С. 62-65.
9. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев: Урожай, 1989. – 144 с.
10. Орда, А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А. Н. Орда. – Минск, 1997. – 226 с.
11. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв двигателями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.
12. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев: Урожай, 1989. – 144 с.
13. Нагорский, И.С. Научные основы повышения эффективности интенсивных технологий в сельскохозяйственном производстве / И.С. Нагорский // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 3. – С. 8-10.
14. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И.В. Медведева (пред. ред. кол.) [и др.]. – Минск, 2019. – 212 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.02.2020