РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

АНИСИМОВ Александр Владимирович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

Методом случайного баланса проведен отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации – конечная влажность зерна: исходная влажность материала, мощность ИК-излучателей; производительность машины, частота вращения вала. Реализована матрица планирования, проведен статистический анализ полученных результатов с помощью программы Statistica 10.0. На основе экспериментальных исследований была получена математическая модель технологического процесса обработки зерна пшеницы в шелушильно-сушильной машине. Определены оптимальные конструктивные и режимные параметры разработанной шелушильно-сушильной машины: при исходной влажности зерна 19 % (сильно переувлажненное зерно) параметр оптимизации – конечная влажность материала – достигает минимальных значений – 15,0–15,5% (зона оптимума) при минимальной производительности машины 500 кг/ч, частоте вращения вала 1350...1400 мин⁻¹ и мощности ИК-излучателей 4 кВт.

Введение. На операции подготовки зерна пшеницы к помолу приходится 10–30 % всех трудозатрат в переработке его в муку и крупу. Правильный выбор режимов обработки зерна позволяет снизить потери, сохранить исходное качество зернового материала, повысить качество конечного продукта [9, 16].

Особенностью технологического процесса подготовки зерна пшеницы к помолу является обязательное проведение гидротермической обработки (ГТО), которая ослабляет связь оболочек зерна с эндоспермом и в то же время может значительно повысить влажность зерна [9].

Повышенная влажность зерна после ГТО должна быть снижена до значений, требуемых по ГОСТу (13,5–15,5 %). Кондиционная влажность зерна, направляемого на размол, достигается за счет сушки. Правильно организованный процесс сушки позволяет не только сохранить высокое качество сырьевого материала, но и улучшить его технологические и качественные показатели: снизить затраты на размол, увеличить белизну муки и срок ее хранения [4, 5].

Но в отличие от крупных промышленных предприятий, в поточно-технологических линиях по переработке зерна малых предприятий (до 30 т/сут.) отсутствуют сушилки после бункеров для отволаживания. Их дополнительная установка сложна и удорожает технологический процесс. Одним из способов, позволяющих снизить влажность зерна, поступающего на размол, и тем самым не только сохранить, но и в ряде случаев улучшить качественные по-

казатели высушиваемого материала, является оснащение шелушильных машин, серийно устанавливаемых в ПТЛ малых предприятий, автоматической системой управления температурой и влажностью зерна с инфракрасным энергоподводом [2].

На основе литературных данных были рассмотрены и систематизированы способы обезвоживания зерна. Их анализ показал, что обеспечивать эффективное и быстрое удаление влаги из внутренних слоев зерновки возможно только применением ИК (инфракрасной) и СВЧ (сверхвысокая частота) сушки [3].

В настоящее время инфракрасное излучение используется практически во всех технологических процессах перерабатывающей промышленности: нагреве, обжарке, выпечке, термообработке зернового сырья, сушке и др. Эффект от воздействия инфракрасного излучения на перерабатываемое сырье связан с ускорением биохимических процессов в клетках при резонансном воздействии поглощаемой энергии на атомные связи.

Высокая проникающая способность инфракрасного излучения позволяет помимо быстрого прогрева зерна еще и изменять его технологические, хлебопекарные и микробиологические свойства, что позволяет получать конечную продукцию высокого качества с повышенным сроком хранения [6, 14, 18–20].

Сушка СВЧ-излучением заключается в том, что подводимая энергия нагревает молекулы воды, содержащейся в зерновке. Такой способ сушки характеризуется высокой скоростью и

равномерностью нагрева продукта по всей толщине слоя [17].

В настоящее время отдельные производители выпускают небольшими партиями зерносушилки, основанные на ИК-излучении, различных конструкций, компоновок и производительности, но все они характеризуются высокой энергоэффективностью, скоростью сушки и низкой температурой нагрева зерна [7, 11–13].

Методика исследований. С учетом вышеизложенного в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ совместно с МИП ООО «Здоровое питание» (в рамках договора с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере №180ГС1/6784 от 25.12.2014, программа СТАРТ) был изготовлен экспериментальный образец шелушильно-сушильной машины для обработки зерновых культур с многофункциональной системой управления технологическим процессом на базе приборов фирмы «ОВЕН»: измерителя-регулятора МПР-51-Щ4, адаптера интерфейса АС-4 (рис. 1) [2, 10]. Данная система позволяет регулировать задаваемые параметры удаленно, автоматизировать процесс сбора и обработки экспериментальных данных, архивировать данные.

Оптимальные условия протекания процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине определяли методом экстремального планирования эксперимента [1, 3, 8, 15].

Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, осуществляли методом случайного баланса, который включает в себя построение матрицы планирования, проведение опытов, обработку полученных результатов и принятие решения относительно отбрасывания малозначимых факторов, а также перехода к следующему этапу исследования [1, 3, 8, 15].

Анализ результатов экспериментов проводили с помощью программного комплекса Statistica 10.

Влажность зерна в потоке определяли с помощью разработанной для машины автоматизированной системы управления (АСУ). Контроль

Рис. 1. Схема системы управления сушкой зерна на базе измерителя-регулятора МПР-51-Щ4

влажности проводили по ГОСТ 13586.5-2015 с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М. Количество битых зерен определяли по ГОСТ 30483-97, натуру зерна – по ГОСТ 54895-2012.

Производительность машины изменялась шиберной заслонкой на выходе из машины. Частота вращения вала задавалась сменой шкивов ременной передачи.

Результаты исследований. Предварительное изучение процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине [4] позволило выделить десять факторов, влияющих на эффективность процесса подсушивания. В качестве параметра оптимизации выбрано значение конечной влажности зерна (на выходе из машины), табл. 1.

Согласно выбранному методу «случайного баланса», при составлении матрицы отсеивающих экспериментов факторы, влияющие на процесс обработки зерна в шелушильно-сушильной машине (выделенные в результате проведенных предварительных исследований [4]), разделили на 2 полуреплики. Первую из них, объединили со случайным расположением значений второй полуреплики и добавили еще 4 строчки (опыты 17–20) с целью определения влияния отобранных факторов на выбранных уровнях (рис. 2).

Опыты проводили на поточно-технологической линии по производству муки ООО «Старый мельник» (г. Энгельс) на опытной установке. В качестве материала использовалась пшеница мягких сортов.

Результаты реализации матрицы экспериментов представлены в табл. 1. Столбец $\bar{y}$ – среднее значение (из 4 опытов) выбранного параметра оптимизации – конечная влажность зерна, а столбцы $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ – скорректированные значения параметра оптимизации с учетом эффектов сильных факторов, в соответствии с которыми (столбец $\bar{y}_2$) в программе Statistica была построена карта Парето эффектов (рис. 3), позволившая выделить четыре самых сильных фактора по степени влияния на параметр оптимизации: x_3 – исходная влажность материала, x_6 – производительность машины, x_8 – частота вращения вала и x_5 – мощность ИК-излучателей.

После выделения сильнейших факторов в целях определения оптимальных условий протекания процесса обработки зерна была построена и реализована матрица планирования, проведен анализ полученных данных по методу Бокса–Бенкина, предусматривающий описание поверхности отклика уравнением первой степени.

Составили матрицу планирования опытов (полуреплику полного факторного эксперимента 2^4), табл. 2. После проведения опытов (согласно матрице) результаты исследований были проанализированы с помощью программы Statistica (модуль Планирование эксперимента), определены

Факторы, влияющие на эффективность подсушивания зерна, их условные обозначения и намеченные уровни варьирования (параметр оптимизации – конечная влажность зерна)

Обозначение	Наименование фактора	Размерность	Уровни варьирования	
			нижн.(-)	верхн.(+)
X_1	Вид ИК-излучателя («светлый» или «темный») (- при КГТ-1000; + при ТЭН)	–	–	+
X_2	Равномерность подачи материала	–	Неравномерная	Равномерная
X_3	Исходная влажность материала	%	16	19
X_4	Температура зерна на входе в машину	°С	15	35
X_5	Мощность ИК-излучателей	кВт	2	4
X_6	Производительность машины	кг/ч	500	1000
X_7	Угол наклона выштамповки на ситовом барабане	град	15	25
X_8	Частота вращения вала (скорость агента сушки – воздуха)	мин ⁻¹	1100	1600
X_9	Равномерность материала по влажности	–	Неравномерная	Равномерная
X_{10}	Размер зерновок (натура)	г/л	730	780

Данные: Случайный Баланс матрица 25х20

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Y	Y1	Y2	Y3	Регр15
1	-	16	15	4	500	25	1100	-	730	14,1	14,5	16,9			
2	+	16	35	4	500	25	1600	-	730	14,1	12,3	14			
3	-	16	35	4	1000	15	1100	-	780	17,4	19,2	17,9			
4	+	16	35	2	500	25	1600	-	780	14,4	12,6	16			
5	+	16	35	2	1000	25	1100	-	780	15,4	15,4	15,1			
6	+	16	35	2	1000	15	1600	-	780	14	15,8	15,8			
7	+	16	15	2	500	25	1600	-	730	14,8	14,8	14,3			
8	-	16	15	2	1000	25	1600	-	730	16,1	15,9	16,3			
9	+	16	15	4	100	25	1100	-	730	17,3	19,1	16,2			
10	+	16	15	4	500	15	1100	-	730	14	12,2	15			
11	+	16	35	4	500	25	1600	-	730	15,3	15,3	15			
12	+	16	35	4	500	25	1100	-	730	14,3	14,3	15,3			
13	+	16	15	2	500	25	1600	-	730	15,1	14,9	15,3			
14	-	16	35	2	1000	25	1600	-	730	15,3	15,5	15,8			
15	-	16	15	4	500	25	1100	-	730	14,3	14,3	15,3			
16	+	16	15	2	1000	15	1100	-	730	15,3	15,3	15			
17	+	16	35	4	500	25	1600	-	780	17,8	19,4	17,3			
18	-	16	35	4	500	25	1100	-	730	14,3	12,3	15,3			
19	-	16	35	2	500	25	1100	-	730	15,3	15	15,3			
20	+	16	15	4	500	15	1600	-	730	15	15	14			

Рис. 2. Матрица отсеивающих экспериментов

Рис. 3. Диаграмма эффектов факторов (карта Парето эффектов)

коэффициенты регрессии. Результаты представлены на рис. 4.

Адекватность полученной модели линейной проверяли по гипотезе о равенстве нулю коэффициентов уравнения регрессии и свободного члена путем сравнения расчетного уровня значимости свободного члена и

Результаты дисперсионного анализа

Фактор	Регресс.	Ст. Ош.	t(3)	p	-95 %	+95 %
Сред. Св. член	0,562500	0,192300	2,925122	0,061242	-0,04948	1,17448
(1)X3	-0,100000	0,384509	-0,260011	0,811679	-1,32397	1,12397
(2)X6	0,003500	0,001538	2,275095	0,107419	-0,00140	0,00840
(4)X8	0,000000	0,001538	0,000000	1,000000	-0,00490	0,00490

Рис. 4. Результаты дисперсионного анализа

факторов p с заданным уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Из таблицы регрессионного анализа (см. рис. 4) видно, что расчетный уровень значимости p для свободного члена и всех факторов превышает $\alpha = 0,05$, т.е. полученная модель не адекватна линейной, и область оптимума необходимо описывать уравнением второго порядка.

В нашем случае при переходе к планированию второго порядка нулевая точка факторного пространства оставлена прежней и уровни варьирования факторов также не изменились.

Для изучения и описания области оптимума выбран план Бокса (B_d), близкий к D – оптимальному [1, 15], рис. 5.

После реализации матрицы планирования второго порядка был проведен дисперсионный анализ в программе Statistica, результаты представлены на рис. 6.

С учетом полученных коэффициентов регрессии и их значимости (см. рис. 6), составили уравнение регрессии второго порядка:

**Матрица экстремального планирования эксперимента
(параметр оптимизации – конечная влажность материала)**

Обозначения	Исходная влажность материала X_3 , %	Мощность ИК-излучателей X_5 , кВт	Производительность машины X_6 , кг/ч	Частота вращения вала X_8 , мин ⁻¹	Конечная влажность материала Y_1 , %
Верхний уровень (+)	19	4	1000	1600	
Основной уровень (0)	17	3	750	1350	
Нижний уровень (-)	15	2	500	1100	
Опыт					
1	–	+	+	+	14,7
2	+	–	+	+	18,3
3	+	+	–	+	14,8
4	–	–	–	+	14,2
5	+	+	+	–	18,0
6	–	–	+	–	14,5
7	–	+	–	–	14,1
8	+	–	–	–	15,4

	1 X3	2 X5	3 X6	4 X8	Параметр оптимизации
1	19	4	1000	1600	16,2
2	19	4	1000	1100	16,4
3	19	4	500	1600	14,2
4	19	4	500	1100	14,4
5	19	2	1000	1600	16,8
6	19	2	1000	1100	17,1
7	19	2	500	1600	14,5
8	15	2	500	1100	13,9
9	15	4	1000	1600	14,4
10	15	4	1000	1100	14,6
11	15	4	500	1600	13,7
12	15	4	500	1100	13,9
13	15	2	1000	1600	14,2
14	15	2	1000	1100	14
15	15	2	500	1600	14,1
16	15	2	500	1100	14,4
17	19	3	750	1350	15,5
18	15	3	750	1350	14,2
19	17	4	750	1350	14,8
20	17	2	750	1350	14,6
21	17	3	1000	1350	16,2
22	17	3	500	1350	14,8
23	17	3	750	1600	15,3
24	17	3	750	1100	15,5
25					

Рис. 5. Матрица планирования второго порядка V_4

Рис. 6. Результаты дисперсионного анализа и проверки на адекватность

$$y_1 = 14,97 + 0,74x_3 + 0,17x_3^2 + 0,25x_5^5 + 0,62x_6 + 0,44x_3x_6.$$

Проверку адекватности уравнения второго порядка производили сравнением расчетного критерия Фишера с табличным ($F_p \leq F_{\text{табл}}$).

Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{рас}} = 0,63$ (см. рис. 6) меньше табличного критического значения $F_{\text{кр}} = 4,45$, взятого для степеней свободы $f_1 = 17, f_2 = 1$, следовательно, полученное уравнение второго порядка адекватно и может быть принято за математическую модель, описывающую влияние исследуемых факторов на показатели эффективности обработки зерна.

В соответствии с экспериментальными данными построили двумерные поверхности отклика (рис. 7).

Рис. 7. Трехмерное сечение поверхности отклика, характеризующее конечную влажность материала: а – в зависимости от факторов X_3 (исходная влажность материала) и X_6 (производительность машины) (при $X_5 = 3$ кВт и $X_8 = 1350$ мин⁻¹); б – в зависимости от факторов X_3 (исходная влажность материала) и X_5 (мощность ИК-излучателей) (при $X_6 = 750$ кг/ч и $X_8 = 1350$ мин⁻¹); в – в зависимости от факторов X_5 и X_6 (при $X_3 = 17\%$ и $X_8 = 1350$ мин⁻¹)

Заключение. Анализируя трехмерные поверхности отклика (см. рис. 7), можно сделать вывод, что при исходной влажности зерна 19 % (сильно переувлажненное зерно) параметр оптимизации – конечная влажность материала – достигает минимальных значений – 15,0–15,5 % (зона оптимума) при минимальной производительности машины 500 кг/ч, частоте вращения вала 1350–1400 мин⁻¹ и мощности ИК-излучателей 4 кВт.

Кроме того, можно утверждать, что даже на максимальной производительности 1000 кг/ч и максимальной мощности ИК-излучателей 4 кВт, обеспечивается снижение влажности материала с исходной 19 до конечной 17 %, что позволит избежать залипания рабочих органов и поверхностей оборудования при переработке переувлажненного зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов А.В. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств комбинированными кормами путем обоснования конструктивно-режимных параметров загрузочного распределяющего устройства: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2006. – 165 с.
2. Анисимов А.В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2015. – № 6. – С. 53–56.
3. Анисимов А. В., Рудик Ф.Я., Загородских Б.П. Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 4. – С. 603–623.
4. Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения / В.В. Беляев [и др.] // Горизонты образования. – 2017. – № 19. – С. 1–4.
5. Глухарев В.А., Сивицкий Д.В., Попов И.Н., Верзилин А.А. Определение оптимальных режимов энергоэффективного процесса сушки зерна // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 5. – С. 42–45.
6. Давидович Е.А. Влияние ИК-обработки зерна пшеницы и ржи на параметры процесса его измельчения [сырье для производства спирта] // Пищевая и перерабатывающая промышленность. – 2009. – № 4. – С. 1033.
7. Каталог ООО «Производственная компания Старт». Режим доступа: <http://www.pcstart.ru/ik-oborudovaniya> (дата обращения 01.02.2018).
8. Овчинников В.А., Чаткин М.Н., Овчинникова А.В. Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности посева // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 3. – С. 379–388.
9. Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек / Ж.С. Алимкулов [и др.] // Экспресс-информация. – М., 1979. Сер. Мукомольно-крупяная промышленность. –

Т. 1. – Вып. 7. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28337104>.

10. Патент 2491124 Российская Федерация, МПК В02В3/02. Шелушительно-сушильная машина / Анисимов А.В., Богданова М.С.; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. аграрный ун-т имени Н.И.Вавилова. – № 2012104970; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. 7 с., ил.

11. Патент 2134995 РФ, МПК А23Л 1/025, А23В 9/04, F26В 3/30. Установка для термообработки зернового сырья / Н.В. Елькин, В.В. Кирдяшкин; заявитель и патентообладатель Н.В. Елькин, В.В. Кирдяшкин. № 98117679/13; заявл. 29.09.1998; опубл. 27.08.1999, Бюл. №33. – 5 с., ил.

12. Патент 2352880 РФ, МПК F26В330. Сушилка инфракрасная / С.К. Волончук; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Сибирский научно-исследовательский и проектно-технологический институт переработки сельскохозяйственной продукции; заявл. 2007114874/06; опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11. – 5 с., ил.

13. Патент 2459166 РФ, МПК F26В17/12, F26В3/347. Установка для сушки и обработки зерна и кормов / Б.Г. Смирнов, А.Н. Васильев, А.А. Васильев; заявитель и патентообладатель ГНУ ВИ-ЭСХ; заявл. 2010132400/06; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 5 с., ил.

14. Проничев С.А. Импульсная инфракрасная сушка семенного зерна: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 161 с.

15. Радченко Г.Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса. – Горки: Белорусская сельскохозяйственная академия, 1978. – 72 с.

16. Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу: отчет о НИР (итоговый): ООО «Здоровое питание»; рук. Анисимов А.В.; исполн.: Анисимова М.С., Сивицкий Д.В., Алейников А.К. – Саратов, 2015. – 65 с. - рег. № НИОКР 115082610022.

17. Файзрахманов, Ш.Ф. Применение СВЧ для сушки сельскохозяйственной продукции // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции Лапшинские чтения: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., 2013. – С. 369–371.

18. Dondee S., Meeso N., Soponronnarit S., Siritornpun S. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying // Journal of food engineering. 2011, Vol. 104, (1), P. 6–13.

19. Konopka I., Markowski M., Tanska M., Zmójda M., Malkowski M., Białobrzewski I. Image analysis and quality attributes of malting barley grain dried with infrared radiation and in a spouted bed // International journal of food science and technology. 2008, Vol. 43 (11), P. 2047–2055.

20. Liu C.S., Shang T., Yang S.Q., Wu W.F., Chen S.Y. Analysis on the influence of the exchange area on the heat exchange efficiency during far-infrared convection combination grain drying process // International conference on smart grid and electrical automation (ICSGEA), 2017, P. 155–158.

Анисимов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология производства и переработки продукции животноводства», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

410005, г. Саратов, ул. Соколова, 335.
Тел.: (8452) 69-25-32.

Ключевые слова: гидротермическая обработка; сушка; экстремальное планирование эксперимента; параметр оптимизации

RESULTS OF PILOT STUDIES OF THE CAR FOR GRAIN PROCESSING

Anisimov Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the chair "Technology of Production and Processing of Livestock Products", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Keywords: hydroheat treatment; drying; extreme planning of an experiment; optimization parameter.

The random balance method was used to select the most significant factors in degree of their influence on the optimization parameter - final moisture content of the material: initial moisture content of the material, power of IR-radiators, machine productivity, and shaft rotation speed. Plan-

ning matrix was realized, statistical analysis of the results was carried out by the software Statistica 10.0. On the basis of experimental studies, a mathematical model of the technological process of wheat processing in a peeling and drying machine was obtained. Determined optimal design and operating parameters of the developed peeling and drying machine: at initial moisture content of the material of 19% (strongly remoistened grain), optimization parameter (the final moisture content of the material) reaches the minimum values - 15.0-15.5% (an optimum zone), with the minimum machine productivity 500 kg/h, shaft rotation speed 1350-1400 rpm and power of IR-radiators 4 kW.

УДК 631.31 (470.44)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

БОЙКОВ Василий Михайлович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ВОРОТНИКОВ Игорь Леонидович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

СТАРЦЕВ Сергей Викторович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

БАШМАКОВ Игорь Андреевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

На основе рациональной формулы академика В.П. Горячкина дано определение величины работы или энергии затрачиваемой на обработку определенной площади поля на заданную глубину. В результате теоретических исследований обработки поля по традиционному методу установлены графические зависимости работы затрачиваемой при сплошной обработке 1 га пашни от глубины обработки почвы. В результате теоретических исследований полосовой обработки почвы установлены графические зависимости работы затрачиваемой при полосовой обработке 1 га пашни от ширины полосы при максимальной глубине. Предложены возможные варианты снижения энергоемкости обработки почвы в каждом из рассмотренных способов обработки почвы.

Введение. В настоящее время на основную обработку почвы расходуется до 40 % энергозатрат в полеводстве. При этом от качества обработки почвы значительно зависит урожайность сельскохозяйственных культур [1, 5, 6, 10]. Учитывая, что в Российской Федерации ежегодно обрабатывается более 70 млн га пашни [5], можно заключить, что снижение энергоемкости и повышение качества обработки почвы является актуальной проблемой. Если рассматривать процесс основной обработки почвы в технологическом плане, то сущность такого процесса заключается в рыхлении площади поверхности поля на заданную глубину, при этом на обработку поля затрачивается определенное количество энергии.

Методика исследований. На основании большого количества теоретических и экспериментальных исследований, а также феноменологического

описания технологического процесса основной обработки почвы академиком В.П. Горячкиным была разработана рациональная формула для определения силы тяги конных и тракторных плугов, которая имеет следующий вид (1) [4]:

$$R_{пл} = Gf + kav + \varepsilon av_{пл} v^2, \quad (1)$$

где $R_{пл}$ – тяговое сопротивление почвообрабатывающего орудия, Н; G – сила тяжести почвообрабатывающего орудия, Н; f – коэффициент трения корпуса почвообрабатывающего орудия о почву; k – коэффициент, характеризующий способность почвенного пласта сопротивляться деформации, кН/м²; a – глубина обработки почвы, м; v – ширина захвата почвообрабатывающего орудия, м; ε – коэффициент, зависящий от формы рабочего органа и свойств поч-