

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:631.53.01

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-5-16-23

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРАЖИРОВАНИЯ СЕМЯН В БАРАБАННОМ ДРАЖИРАТОРЕ****АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент

energo-andreev@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

**Аннотация.** Вследствие недостаточной изученности условий дражирования семян диатомитно-песочной и глиняно-песочной смесями (ДПС и ГПС) проведены экспериментальные исследования режимов дражирования семян ДПС и ГПС в дражираторе, выполненном из стекла и имеющем форму эллиптического параболоида вращения с диаметром основания 60 мм. Сформулированы требования к качеству драже, обоснована возможность косвенной оценки качества дражирования по количеству смеси, не вступившей в процесс образования драже. Экспериментально подтверждена зависимость прочности оболочки драже от нескольких факторов: частоты вращения и угла наклона рабочего органа, влажности и режима подачи исходных смесей, продолжительности дражирования семян диатомитно-песочной смесью, а также состава смеси на втором этапе дражирования. В результате реализации отсеивающего эксперимента установлено, что на количество смеси, не вступившей в процесс образования драже, существенно влияют влажность исходных смесей, частота вращения рабочего органа и продолжительность дражирования диатомитно-песочной смесью. Поиск области оптимума параметров дражирования произведен методом крутого восхождения Бокса-Уилсона. Участок поверхности отклика описывался отрезком ряда Тейлора, по коэффициентам которого установлено, что наилучший результат достигается при влажности исходной смеси 7%, частоте вращения рабочего органа  $16 \text{ м}^{-1}$  и продолжительности первого этапа дражирования семян диатомитно-песочной смесью 18 мин.

**Ключевые слова:** дражиратор, семена, барабанный рабочий орган, диатомитно-песочная смесь, влажность смеси, продолжительность дражирования, частота вращения рабочего органа

**Формат цитирования:** Андреев С.А. Экспериментальные исследования дражирования семян в барабанном дражираторе // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 16-23. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-16-23>.

© Андреев С.А., 2022



## ORIGINAL PAPER

**EXPERIMENTAL STUDIES OF SEED PELLETIZING IN A DRUM PELLETIZER****SERGEY A. ANDREEV**, PhD (Eng), Associate Professor

energo-andreev@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

**Abstract.** Due to insufficiently studied conditions of pelletizing seeds with diatomaceous-sand and clay-sand mixtures (DSM and CSM), the author conducted experimental research of pelletizing modes of DSM and CSM seeds in a pelletizer made of glass and having the form of an elliptical rotation paraboloid with a base diameter of 60 mm. The author formulated requirements for the quality of pellets and assessed the possibility of indirect evaluation of pelletizing quality by the amount of mixture, which has not entered into the pelletation process. Confirmed experimentally were the dependence of dragee shell strength on several factors, such as rotation frequency and tilt angle of a working tool, moisture and feed mode of initial mixtures, the duration of seed pelletizing with a diatomaceous sand mixture, as well as the mixture composition at the second stage of pelletizing. As a result of screening experiment, it was found that the amount of mixture not involved in the pelletizing process is significantly affected by the humidity of the initial mixtures, the rotation frequency of the working body and the duration of pelletizing with a diatomaceous sand mixture. The search for the region of optimum parameters of pelletizing was made by the Box-Wilson method of steep ascent. The response surface area was described by the segment of Taylor's series, according to the coefficients of which it was found that the best result is achieved with the initial mixture humidity of 7%, the rotation frequency of the working unit of  $16 \text{ m}^{-1}$  and the duration of the first phase of seed pelletizing with a diatomaceous-sandy mixture of 18 minutes.

**Keywords:** pelletizer, seeds, drum working tool, diatomite-sand mixture, mixture humidity, pelletizing duration, working tool rotation frequency

**For citation:** Andreev S.A. Experimental studies of seed pelletizing in a drum pelletizer. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(5): 16-23. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-16-23>.

**Введение.** Среди материалов, используемых для образования оболочки при дражировании семян, особое место занимают диатомитно-песочные (ДПС) и глиняно-песочные смеси (ГПС), которые можно применять без дополнительных клеящих веществ. Оболочка драже, распадаясь во влажной среде, не препятствует развитию семян и не оказывает влияния на состав почвы. Для дражирования с помощью ДПС и ГПС обычно используются дражирователи с барабанными рабочими органами.

Процесс образования оболочки из ДПС и ГПС весьма чувствителен к условиям реализации. Вследствие недостаточной изученности условий дражирования ДПС и ГПС универсальная методика по осуществлению процесса с количественными характеристиками режимов пока не создана. Кроме того, отсутствие научно обоснованных режимов дражирования не позволяет разрабатывать автоматические устройства, осуществляющие покрытие семян оболочкой в отсутствие оператора. Для успешной подготовки семян к посеву в дражирователях с барабанными рабочими органами и автоматизации этого процесса проведение экспериментальных исследований является актуальным.

**Цель исследований:** выявление факторов, влияющих на твердость оболочки драже при обволакивании семян диатомитно-песочной и глиняно-песочной смесями на дражирователе с барабанным рабочим органом; определение численных значений статистически значимых факторов, обеспечивающих максимальную твердость оболочки драже.

**Материалы и методы.** В качестве исходных материалов использованы сведения по дражированию семян ДПС и ГПС, результаты рекогносцировочных экспериментов и опытные данные, полученные на экспериментальном дражирователе. При проведении эксперимента и обработке полученных данных использованы метод дробно-факторного эксперимента, метод крутого восхождения Бокса-Уилсона, а также классическая теория статистики.

В эксперименте использован дражирователь с барабанным рабочим органом, выполненным из стекла и имеющим форму эллиптического параболоида вращения с диаметром основания 60 мм (рис. 1). Изменение угла наклона рабочего органа дражирователя в диапазоне  $30 \dots 70^\circ$  достигалось плавной регулировкой высоты подъема задней части устройства посредством вращения винтового штока диаметром 10 мм. Вращение рабочего органа осуществлялось электродвигателем постоянного тока с независимым возбуждением типа П-11 с номинальной частотой вращения якоря  $1400 \text{ м}^{-1}$  через понижающий механический редуктор типа РЧУ-63А с передаточным отношением 63 и клиноременной передачей с диаметрами шкивов 70 мм и 100 мм [1].

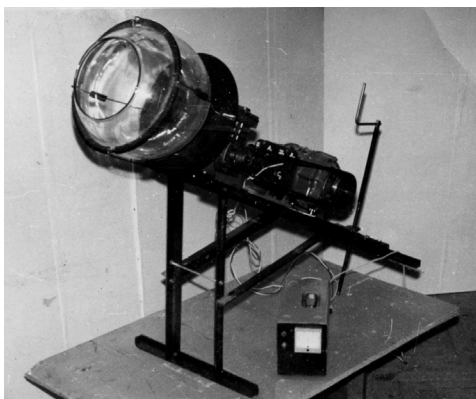


Рис. 1. Экспериментальный дражирователь  
Fig. 1. Experimental pelletizer

Плавное регулирование частоты вращения рабочего органа осуществлялось в диапазоне от 10 до  $60 \text{ м}^{-1}$ . Напряжение в цепи якоря задавалось полупроводниковым регулятором.

Подача водяной суспензии в рабочий орган осуществлялась электрическим краскораспылителем типа «Орол-5М» с диаметром сопла 0,7 мм, установленным на переносном штативе.

В эксперименте использовались семена салата сорта Nolan, усилие на разрушение измерялось динамометром ИМН-5М, а количество неиспользуемой смеси определялось на весах SARTORIUS1201 MP2.

**Результаты и их обсуждение.** Экспериментальный дражирователь семян должен обеспечивать удобное варьирование основных рабочих параметров для их последующей оптимизации. Поэтому при его разработке приняты во внимание опыт исследователей [2] и передовые достижения в области сельскохозяйственного машиностроения [3, 4].

Известно, что качество дражированных семян характеризуется размером, формой, односемянностью, влажностью и прочностью оболочки, а также ее влиянием на прорастание<sup>1</sup>.

Размер драже определяется размерами исходных семян, их энергией прорастания и техническими характеристиками сеялки. Например, для мелкосеменных культур (салата, прутняка, сельдерея) рекомендуемый диаметр драже составляет 2,0...2,5 мм, для среднеразмерных (моркови, капусты, лука, томата) – 3,0...6,0 мм, для крупносеменных (огурцов, свеклы) – 7,0...10,0 мм. Однако размер драже не может являться параметром оптимизации, поскольку легко управляется продолжительностью дражирования, а также последующей калибровкой с помощью сит.

Форма драже должна обеспечивать расположение семени в своем центре, то есть приближаться к сферической. При использовании стеклянного рабочего органа в сочетании с мелкоизмельченными ДПС и ГПС форма драже гарантированно становится сферической и поэтому также не нуждается в оптимизации.

Односемянность предполагает наличие в составе драже только одного семени. Одновременно количество пустых драже не должно превышать 5%. Образование пустых драже, а также драже с несколькими семенами происходит при нарушении режимов подачи водяной суспензии и материалов оболочки, что может быть исключено опытом оператора или автоматизацией процесса.

Оболочка драже должна быстро распадаться во влажной среде и не препятствовать дыхательному процессу семян. Влияние влаги на распад оболочки определяется характеристиками используемых материалов и не зависит от процесса дражирования.

Влажность оболочки драже на уровне 7...9% обеспечивает сохранность семян. Влажность драже легко управляется продолжительностью и интенсивностью сушки и поэтому не может рассматриваться как параметр оптимизации.

Оболочка драже должна обладать достаточной прочностью, исключающей ее преждевременное разрушение при транспортировке или нахождении в бункере сеялки. Прочность оболочки драже зависит от клеящих свойств используемых материалов, а при использовании ДПС и ГПС определяется качеством процесса обволакивания семян. Таким образом, прочность оболочки достаточно полно характеризует качество дражирования и может послужить параметром, для которого следует подбирать эксплуатационные

<sup>1</sup> Яковлев И.Г. Механизация изготовления и посева дражированных семян сельскохозяйственных культур. Фрунзе: Кыргызстан, 1977. 84 с.

характеристики дражиратора. Прочность оболочки можно регулировать изменением параметров процесса дражирования семян. Прочность оболочки определяется усилием, при котором происходит ее разрушение (для кондиционных драже составляет 300...450 г)<sup>2</sup>. Измерение прочности оболочки большого количества драже в производственных условиях малоэффективно, поэтому для непрерывного процесса образования драже нужен параметр, позволяющий с достаточной точностью получать информацию о прочности оболочки.

При эксплуатации дражиратора с прозрачным рабочим органом замечено, что при нарушении дражирования часть смеси, предназначенной для образования драже, оседает на его внутренней поверхности и не участвует в процессе.

Смесь не налипает на поверхность семян или, налипнув, через несколько секунд отсоединяется.

Сделано предположение о том, что о прочности оболочки драже можно судить по количеству смеси, не вступившего в процесс, или по количеству неиспользуемой смеси (КНС). Для проверки справедливости этой гипотезы осуществлен эксперимент, в ходе которого задавались различные режимы дражирования, измерялись прочность оболочки драже и количество неиспользуемой смеси в рабочем органе.

На первом этапе эксперимента измерялись усилия на разрушение оболочки драже, полученных при различных режимах дражирования в шестикратной повторности, и рассчитывалась существенность разностей средних значений массива (табл. 1).

Таблица 1

Усилие на разрушение оболочки драже при различных частотах вращения рабочего органа

Table 1

Force on the destruction of the pellet shell at different rotation frequencies of the working tool

Частота вращения рабочего органа, м <sup>-1</sup> <i>Rotation frequency of the working tool, m<sup>-1</sup></i>	Усилие на разрушение по повторностям, г <i>Breaking force by repetitions, g</i>						Среднее усилие на разрушение, г <i>Average breaking force, g</i>
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	
10	78	85	62	81	69	75	75
20	129	142	146	134	140	137	138
25	215	212	196	300	185	192	200
30	250	263	260	270	258	277	263
35	352	360	362	350	343	333	350
40	431	418	396	412	425	438	420
50	477	501	494	481	472	485	485

По результатам дисперсионного анализа отвергнута статистическая нулевая гипотеза  $H_0$  об отсутствии существенных различий между средними значениями усилий на разрушение при заданных частотах вращения рабочего органа:  $F_{cp} > F_{05}$  при  $HCP_{05} = 12,49$  г. На основании полученных

результатов сделан вывод о том, что анализируемые средние значения могут быть рассмотрены как аргументы для выявления корреляционной связи с соответствующими значениями КНС. Количество неиспользуемой смеси измерялось для всех образцов драже в шестикратной повторности (табл. 2).

Таблица 2

Масса смеси, не вступившей в процесс образования драже, для образцов с различными усилиями на разрушение

Table 2

Mass of the mixture not involved in the pelletizing process for samples with different breaking forces

Усилие на разрушение, г <i>Breaking force, g</i>	Масса смеси, не вступившей в процесс образования драже, г <i>Mass of the mixture that did not enter into the pelletation process, g</i>						Среднее значение массы смеси, г <i>Average value of the mixture mass, g</i>
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	
75	2,18	2,21	2,16	2,17	2,17	2,16	2,175
138	2,07	2,03	2,03	2,03	2,03	2,04	2,040
200	1,85	1,80	1,84	1,82	1,81	1,80	1,820
263	1,58	1,56	1,55	1,57	1,54	1,56	1,560
350	1,27	1,28	1,31	1,33	1,32	1,29	1,300
420	1,00	0,95	1,05	1,00	1,04	1,02	1,010
485	0,78	0,80	0,80	0,76	0,78	0,76	0,780

В результате дисперсионного анализа установлено, что средние по повторностям значения КНС при выбранных усилиях

на разрушение характеризуются существенными различиями на 5%-ном уровне значимости:  $F_{\phi} > F_{05}$  при  $HCP_{05} = 2,58 \cdot 10^{-2}$  г.

<sup>2</sup> Справочник по овощеводству / В.И. Алексашин, А.В. Алпатьев, Р.А. Андреева и др.; Отв. ред. В.А. Брызгалов. Л.: Колос, 1982. 511 с.

На втором этапе определялись наличие и вид статистически достоверной связи между КНС ( $Y$ ) и усилием на разрушение оболочки ( $X$ ). Коэффициент корреляции, найденный исходя из предположения о линейном характере зависимости  $Y = f(X)$ , оказался статистически значимым и равным 0,995. Полученное значение свидетельствует о сильной существенной корреляционной связи  $Y$  и  $X$ . В соответствии с критерием Блэкмана [5] посредством сравнения найденного коэффициента корреляции и корреляционного отношения доказана линейность обнаруженной зависимости. Степень изменчивости результирующего признака под воздействием исследуемого фактора рассчитывалась методом наименьших квадратов [6], после чего определялись коэффициенты уравнения регрессии, записанного в виде прямой  $Y = b_0 + b_1 X$ ,  $b_0 = 2,386$ ;  $b_1 = -3,141 \cdot 10^{-3}$

По величине коэффициента детерминации ( $d_{yx} = r_{yx}^2 = 0,991$ ) можно сделать вывод о том, что примерно 99% КНС, связано с изменениями прочности оболочки, и только 1% изменений обусловлен другими факторами. Таким образом, КНС дает интегральную оценку качества дражирования и может быть измерен посредством взвешивания. Помимо этого, доказанная зависимость создает предпосылки автоматизации процесса при измерении КНС оптико-электронными средствами.

Ввиду отсутствия однозначной информации о всех факторах, существенно влияющих на процесс дражирования, произведен отсеивающий эксперимент по исследованию ряда априорно полученных воздействий, которые должны быть легко измеряемыми, управляемыми и отвечать условиям однозначности, совместимости и независимости. Первоочередному анализу подлежали конструкционные и технологические факторы, характеризующие особенности дражирования семян ДПС и ГПС смесями в барабанном рабочем органе с гладкой внутренней поверхностью.

При дражировании происходят хаотичные движения частиц исходных смесей и семян относительно друг друга. Известно, что эффективность процесса сильно зависит от интенсивности этого движения, определяемого скоростью  $v$ , которая задается частотой вращения  $n$  рабочего органа. По соображениям безопасности, удобства эксплуатации и прочности конструкции эта величина находится в диапазоне  $40 \dots 60 \text{ м}^{-1}$ . С другой стороны, поступательная скорость дражируемой массы связана с радиусом рабочего органа, имеющего форму эллиптического параболоида вращения, и зависит и от угла наклона рабочего органа.

Функцию двух переменных в обобщенном виде можно записать как

$$v = f_1(n; \alpha). \quad (1)$$

Помимо поступательной скорости дражируемой массы, на эффективность дражирования в значительной мере влияет вращательная скорость  $v_1$  отдельных семян, которая определяется поступательной скоростью дражируемой массы и радиусом параболоида в месте ее расположения:

$$v_1 = f_2[\alpha; f_1(n; \alpha)]. \quad (2)$$

Поскольку зависимость (2) представляет собой сложную функцию, экспериментальное исследование влияния  $\alpha$  и  $n$  осуществлялось при одновременном варьировании этих факторов. Кроме того, необходимо выявить влияние на эффективность дражирования влажности исходных смесей, а также режимов их подачи. Эти режимы определяются одновременным или поочередным характером впрыска воды и смесей

в рабочий орган. Ранее подобные режимы исследовались в условиях дражирования порошковидным торфом и водной суспензией бентонитовой глины [7]. Однако при использовании ДПС и ГПС режимы их подачи следует уточнить. Необходимо выявить влияние на эффективность дражирования длительности обволакивания семян ДПС и содержания песка в ГПС.

Как правило, первый этап дражирования семян ДПС продолжается до приобретения драже шарообразной формы (обычно через 7-20 мин) и определяется оператором визуально. Иногда первый этап длится менее 5 мин, однако его количественные характеристики в настоящий момент не установлены.

На втором этапе для «закрепления» шарообразной оболочки, обеспечения вращательного движения драже и предотвращения их слипания в материал, помимо глины, иногда добавляется некоторое количество песка. Однако толщина внешнего слоя оболочки незначительна, и при достаточно мелком помоле частиц смеси образующиеся трещины не могут привести к снижению прочности. Можно сделать предположение о том, что добавление песка в состав смеси на втором этапе является необоснованным. Для принятия или отрицания этого предположения необходимо провести исследование. Исходя из технических возможностей эксперимента и технологической целесообразности определены диапазоны варьирования факторов и приняты обозначения (табл. 3)

Таблица 3

### Обозначения и диапазоны варьирования исследуемых факторов

Table 3

#### Designations and ranges of variation of the studied factors

Исследуемый фактор <i>Studied factor</i>	Обозначение фактора <i>Factor designation</i>	Верхний уровень варьирования <i>Upper level of variation</i>	Нижний уровень варьирования <i>Lower level of variation</i>	Интервал варьирования фактора <i>Factor variation interval</i>
Угол наклона рабочего органа, $\alpha$ , ° <i>Angle of inclination of the working tool, <math>\alpha</math>, °</i>	$x_1$	62	53	45
Влажность исходной смеси, $\varphi$ , % <i>Humidity of the initial mixture, <math>\varphi</math>, %</i>	$x_2$	45	25	10
Частота вращения рабочего органа, $n$ , $\text{м}^{-1}$ <i>Rotation frequency of the working tool, <math>n</math>, <math>\text{м}^{-1}</math></i>	$x_3$	50	10	20
Соотношение песка и глины в смеси на втором этапе, $m$ <i>Ratio of sand and clay in the mixture at the second stage, <math>m</math></i>	$x_4$	2	0	1
Продолжительность первого этапа дражирования, $t$ , мин <i>Duration of the first stage of pelletizing, <math>t</math>, min</i>	$x_5$	25	15	5
Режим подачи воды и смеси <i>Water and mixture supply mode</i>	$x_6$	Одновременно	Поочередно	-

Реализуем стандартную матрицу [8] и произведем кодирование уровней в соответствии с выражением:

$$x_i = \frac{x_i' - x_i^0}{I_i'} \quad (3)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;  $x_i'$  – значение фактора в натуральном виде на произвольном уровне;  $x_i^0$  – значение фактора в натуральном виде на нулевом уровне;  $I_i'$  – интервал варьирования фактора в натуральном виде.

Для реализации составной план-матрицы проведена серия опытов, результаты которых в форме параметра оптимизации представлены в таблице 4.

Эксперимент в каждой точке проводился дважды. Степень влияния каждого фактора на параметр оптимизации определялась в соответствии с выражением:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_{i,j}}{n}, \quad (4)$$

где  $b_i$  – коэффициент регрессии  $j$ -го фактора;  $y_i$  – значение параметра оптимизации в  $i$ -м опыте;  $x_{i,j}$  – кодированное значение  $j$ -го фактора в  $i$ -м опыте;  $n$  – количество опытов в матрице.

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов регрессии:  $b_1 = 7 \cdot 10^{-3}$ ;  $b_2 = 4,031 \cdot 10^{-1}$ ;  $b_3 = 1,04 \cdot 10^{-1}$ ;  $b_4 = -2,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $b_5 = 5,1 \cdot 10^{-2}$ ;  $b_6 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ . При этом ошибка эксперимента рассчитывалась по формуле:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_i)^2}{mn_1}},$$

где  $n_1$  – количество опытов с повторениями;  $m$  – количество повторений каждого опыта,  $m = 0,016$ .

Таблица 4

Матрица дробной реплики и план проведения отсеивающего эксперимента

Table 4

Fractional replica matrix and a plan for conducting a screening experiment

№ опыта Experiment number	Исследуемые факторы Studied factors												Количество неиспользуемой смеси, г Amount of unused mixture, g		
	$x_1$		$x_2$		$x_3$		$x_4$		$x_5$		$x_6$		Серия опытов A series of experiments		Среднее значение Mean
	К	Н	К	Н	К	Н	К	Н	К	Н	К	Н	I	II	
1	–	53	–	25	–	10	–	0	–	1,5	–	Нет	0,924	0,860	0,892
2	+	62	+	45	+	50	+	2	–	1,5	–	Нет	1,896	1,846	1,871
3	+	62	+	45	–	10	–	0	+	2,5	–	Да	1,830	1,894	1,862
4	+	62	–	25	+	50	–	0	–	1,5	+	Да	1,330	1,260	1,295
5	+	62	–	25	–	10	+	2	+	2,5	–	Нет	1,079	1,101	1,090
6	–	53	+	45	+	50	–	0	+	2,5	–	Нет	2,100	2,180	2,140
7	–	53	+	45	–	10	+	2	–	1,5	+	Да	1,965	1,963	1,829
8	–	53	–	25	+	50	+	2	+	2,5	+	Да	1,170	1,232	1,201

Примечание. К и Н – кодированные и натуральные значения исследуемых факторов.

Note. K and H – coded and natural values of the studied factors.

Величина доверительного интервала определялась по критерию Стьюдента:

$$\Delta b_i = \pm t_{05} S_{b_i}, \quad (5)$$

где  $t_{05}$  – табличное значение критерия Стьюдента  $\Delta b_i = 0,036$ . Ранжировочная кривая, иллюстрирующая степень влияния каждого фактора на КНС, представлена на рисунке 2.

Из ранжировочной кривой следует, что на величину КНС существенно влияют второй, третий и пятый факторы. В то же время четвертый, шестой и первый факторы остаются соизмеримыми с ошибкой опыта. Следовательно, на процесс образования драже статистически достоверно влияют влажность ( $x_2$ ) исходной смеси, частота вращения ( $x_3$ ) рабочего органа и продолжительность ( $x_5$ ) первого этапа дражирования. Другие факторы на качество исследуемого процесса не влияют.

Поиск области оптимума параметров дражирования произведен методом крутого восхождения Бокса-Уилсона [9]. Для реализации метода осуществлялись последовательное выполнение дробно-факторного эксперимента, статистический анализ коэффициентов выборки, обоснование шага и крутое восхождение по поверхности отклика. Участок

поверхности отклика описывался полиномом первой степени исходя из результатов предварительного эксперимента:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i. \quad (6)$$

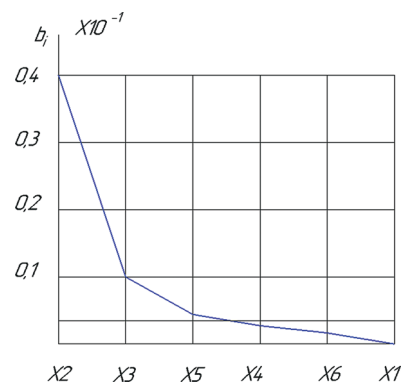


Рис. 2. Ранжировочная кривая влияния факторов при отсеивающем эксперименте

Fig. 2. Ranking curve of the influence of factors in the screening experiment

План-матрица для текущей серии опытов формировалась по ранее использованной методике для отсеивающего эксперимента. Посредством дифференцирования полученного полинома находился градиент общей функции:

$$\nabla y = \frac{\partial y}{\partial x_1} i + \frac{\partial y}{\partial x_2} j + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n}. \quad (7)$$

В итоге этот градиент выродится в сумму коэффициентов регрессии:

$$\nabla y = b_1 + b_2 + \dots + b_n, \quad (8)$$

где  $b_1 = 0,0070$ ;  $b_2 = 0,4031$ ;  $b_3 = 0,1040$ ;  $b_4 = -0,0250$ ;  $b_5 = 0,0070$ ;  $b_n = 0,0240$ .

Коэффициенты регрессии, а также их произведения на величины интервалов варьирования каждого фактора  $b_i I_i$ , значения шагов по каждому фактору для последующих опытов представлены в таблице 5.

Первый и четвертый факторы стабилизировались на исходном уровне вследствие незначительности шагов их варьирования. С целью определения условий новых опытов выбранные шаги добавлялись к нулевому уровню факторов. Результаты опытов (теоретические) определялись на основе полинома (7). Реализация намеченных опытов продолжалась до достижения оптимального значения. Результаты эксперимента сведены в таблицу 6.

При уменьшении затрат на эксперимент сначала проводился десятый и одиннадцатый опыты теоретически (мысленно). Во избежание пропуска возможного оптимума реализовывался двенадцатый опыт. Поскольку опыт показал положительный результат (КНС ниже, чем на нулевом уровне, в девятом опыте), опыт 13 воспроизводился теоретически. Аналогично реализовывался четырнадцатый, пятнадцатый и шестнадцатый опыты. Примечательно, что в шестнадцатом опыте КНС становится равным нулю.

Таблица 5

### Крутое восхождение по плану Бокса-Уилсона

Table 5

#### Steep ascent according to the Box-Wilson plan

Фактор / Factor	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
Коэффициент регрессии, $b_i$ / Regression coefficient, $b_i$	0,007	0,403	0,104	-0,025	0,051
Интервал варьирования, $I_i$ / Variation interval, $I_i$	4,5	10	20	1	5
Шаг поиска, $b_i I_i$ / Search step, $b_i I_i$	0,03	4	2	-0,025	0,3
Нулевой уровень / Zero level	57,5	35	30	1	20

Таблица 6

### План поиска оптимальных значений исследуемых факторов методом Бокса-Уилсона

Table 6

#### Search plan for the optimal values of the studied factors by the Box-Wilson method

№ опыта Experiment number	Опыт Experiment	Исследуемые факторы Studied factors					Количество неиспользуемой смеси, г Amount of unused mixture, g		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	I	II	Среднее значение Mean
9	Нулевой уровень / Zero level	57,5	35	30	1,00	20,0	1,515	1,385	1,450
10	Теоретический / Theoretical	57,47	31	28	1,03	19,7	–	–	–
11	Теоретический / Theoretical	57,41	27	26	1,06	14,4	–	–	–
12	Эксперимент / Experiment	57,38	23	24	1,09	19,1	1,075	–	1,075
13	Теоретический / Theoretical	57,35	19	22	1,11	18,8	–	–	–
14	Эксперимент / Experiment	57,32	15	20	1,14	18,5	0,485	–	0,485
15	Эксперимент / Experiment	57,29	11	18	1,17	18,2	0,171ë	0,192	0,185
16	Эксперимент / Experiment	57,26	7	10	1,20	18,0	0	0	0

Наилучший результат достигается при влажности исходной смеси 7%, частоте вращения рабочего органа 16 м<sup>-1</sup> и продолжительности первого этапа дражирования семян диатомитно-песочной смесью 18 мин.

Для математического описания зависимости КНС от анализируемых факторов воспользуемся отрезком ряда Тейлора, представленного в виде полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (9)$$

где  $k$  – количество факторов.

Применяя трехфакторный план Бокса-Бенкина (табл. 7), выберем уровни и интервалы варьирования факторов для их приведения к условиям стандартной матрицы (табл. 8).

Таблица 7

План Бокса-Бенкина (B – B<sub>3</sub>) для k = 3

Table 7

Box-Benkin Plan (B – B<sub>3</sub>) for k = 3

Фактор Factor	Номер опыта / Experiment number												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
x <sub>1</sub>	+	+	–	–	+	+	–	–	0	0	0	0	0
x <sub>2</sub>	+	–	+	–	0	0	0	0	+	+	–	–	0
x <sub>3</sub>	0	0	0	0	+	–	+	–	+	–	+	–	0

Таблица 8

Матрица варьирования исследуемых факторов

Table 8

Matrix of variation of the studied factors

Фактор / Factor	x <sub>2</sub> , %	x <sub>3</sub> , м <sup>-1</sup>	x <sub>5</sub> , мин
Уровень / Level:			
Верхний / upper	60	60	30
Средний / average	40	30	20
Нижний / lower	20	0	10
Интервал варьирования Variation interval	20	30	10

Сформированная матрица, натуральные значения факторов и значения параметра оптимизации представлены в таблице 9. Реализованы все 13 опытов, при которых КНС максимально, минимально, имеет среднее значение.

Для доказательства неслучайности параметров оптимизации проверялась однородность дисперсий в соответствии с критерием Кохрена, с определением дисперсии результатов повторных опытов и сравнении максимальной дисперсии с их суммой:

$$G = \frac{S_i^2}{\sum_{i=1}^4 S_i^2}, \tag{10}$$

где G = 0,80; G<sub>табл</sub><sup>005</sup> = 0,91.

G < G<sub>табл</sub><sup>005</sup>, следовательно, однородность дисперсий доказана.

Таблица 9

Проверка адекватности математической модели

Table 9

Checking the adequacy of the mathematical model

№ опыта Experiment number	Значение факторов / Importance of factors						Эффект взаимодействия Interaction effect			Квадрат фактора Factor squared			Серия опытов A series of experiments		Среднее значение Mean	Расчетное значение Estimated value
	x <sub>1</sub>		x <sub>2</sub>		x <sub>3</sub>		x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>5</sub>	x <sub>3</sub> x <sub>5</sub>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>5</sub> <sup>2</sup>	I	II		
	к	н	к	н	к	н										
1	+	60	+	60	0	20	+	0	0	+	+	0	2,4	2,1	2,25	2,15
2	+	60	–	0	0	20	–	0	0	+	+	0	1,9	–	1,90	1,94
3	–	20	+	60	0	20	–	0	0	+	+	0	1,1	–	1,10	1,10
4	–	20	–	0	0	20	+	0	0	+	+	0	0,5	0,6	0,55	0,61
5	+	60	0	30	+	30	0	+	0	+	0	+	2,2	–	2,20	2,12
6	+	60	0	30	–	10	0	–	0	+	0	+	2,1	–	2,10	2,09
7	–	20	0	30	+	30	0	–	0	+	0	+	0,9	–	0,90	0,98
8	–	20	0	30	–	10	0	+	0	+	0	+	1,0	0,9	0,95	0,91
9	0	40	+	60	+	30	0	0	+	0	+	+	1,9	–	1,90	1,98
10	0	40	+	60	–	10	0	0	–	0	+	+	1,8	–	1,80	1,88
11	0	40	–	0	+	30	0	0	–	0	+	+	1,7	–	1,70	1,62
12	0	40	–	0	–	10	0	0	+	0	+	+	1,6	–	1,60	1,56
13	0	40	–	30	0	20	0	0	0	0	0	0	1,7	1,8	1,75	1,72

Используя расчетный коэффициент T<sub>i</sub>, вычислим коэффициенты регрессии полинома (8) по формулам:

$$b_0 = T_1 \sum_{i=1}^k y_i - T_2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_i^2 y_j; \tag{11}$$

$$b_i = T_3 \sum_{i=1}^n x_i y_i; \tag{12}$$

$$b_{ii} = T_4 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + T_5 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_i^2 - T_2 \sum_{j=1}^k y_j; \tag{13}$$

$$b_{ij} = T_6 \sum_{i=1}^n x_i x_j y_i. \tag{14}$$

$$b_0 = 1,715; b_2 = 0,600; b_3 = 0,171; b_5 = 0,043; b_{23} = -0,066; b_{25} = 0,004; b_{35} = 0,011; b_{22} = -0,241; b_{33} = -0,028; b_{55} = -0,071.$$

КНС может быть определено в соответствии с полиномом

$$y = 1,715 + 0,600x_2 + 0,171x_3 + 0,043x_5 - 0,066x_2x_3 + 0,004x_2x_5 + 0,011x_3x_5 - 0,241x_2^2 - 0,028x_3^2 + 0,071x_5. \quad (15)$$

Определим адекватность полинома по критерию Фишера. Для этого рассчитаем все значения параметра оптимизации, соответствующие условиям эксперимента. Дисперсию адекватности подсчитаем в соответствии с выражением:

$$S_{ay} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (y_i - y_i)^2}{n - k - 1}, \quad (16)$$

где  $S_{ay} = 0,04$ .

Расчетное значение критерия Фишера определится отношением  $F_{расч} = \frac{S_{ay}^2}{S_{оп}^2}$ ,  $F_{расч} = 0,135$ , табличное  $-F_{табл}^{005} = 3,63$ .

По полученному неравенству  $F_{расч} < F_{табл}$  делаем вывод об адекватности математической модели.

Из уравнения регрессии следует, что наибольшее влияние на прочность оболочки оказывает влажность исходной смеси, превышение ее более 7% ведет к значительному снижению параметра

#### Список использованных источников

1. Шарков Г.А., Андреев С.А., Сабетов А.Н. Советуем: дражируйте семена // Приусадебное хозяйство. 1986. № 5. 33 с.
2. Курзенков С.В., Михеев Д.А. Прогрессивные технологии и оборудование для дражирования семян // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: Материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 21-22 октября 2015 г.). Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015. Т. 2. С. 123-129. EDN: YRRZBP.
3. Михеев Д.А. Способы дражирования семян // Молодежь и инновации-2013: Международной научно-практической конференции молодых ученых (г. Горки, 29-30 мая 2013 г.). Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. Ч. 2. С. 19-21.
4. Corlett F.M.F., Rufino C.A., Vieira J.F., Tavares L.C., Tunes L.V.M., Barros A.C.S.A. The influence of seed coating on the vigor and early seeding growth of barley. *Ciencia e investigacion agraria*. 2014; 41 (1): 129-136. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000100013>
5. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.: Наука, 1970. 367 с.
6. Спирина М.С. Теория вероятностей и математическая статистика / М.С. Спирина, П.А. Спирин. 4-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 352 с.
7. Шахматов В.П. Разработка элементов промышленной технологии выращивания рассады овощных культур с использованием дражированных семян: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1983. 206 с.
8. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 522 с.
9. Дэниэл К. Применение статистики в промышленном эксперименте. М.: Мир, 1979. 299 с.

#### Критерии авторства

Андреев С.А. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провел эксперимент и подготовил рукопись. Андреев С.А. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022

Одобрена после рецензирования 30.07.2022

Принята к публикации 01.08.2022

оптимизации. Затем, в порядке убывания, следуют частота вращения рабочего органа и продолжительность первого этапа дражирования (при использовании диатомитно-песочной смеси).

Знаки эффектов взаимодействия показывают, что на прочность оболочки влияет одновременное изменение влажности исходной смеси и частоты вращения рабочего органа или влажности исходной смеси и продолжительности первого этапа дражирования на одинаковом или противоположном уровнях соответственно. В то же время статистически значимое изменение прочности может быть обусловлено изменением частоты вращения рабочего органа и продолжительностью первого этапа дражирования на противоположных уровнях.

#### Выводы

1. Прочность оболочки драже можно оценить по количеству смеси, не вступившей в процесс.
2. Оптимальный режим дражирования семян диатомитно-песочной и глиняно-песочной смесями достигается при влажности исходных смесей 7%, частоте вращения рабочего органа  $16 \text{ м}^{-1}$  (при использовании дражирователя диаметром 0,4 м и гладкой внутренней поверхностью) и продолжительности первого этапа дражирования 18 мин.

#### References

1. Sharkov G.A., Andreev S.A., Sabetov A.N. Sovetuyem: drazhiruyte seme-na [Our advice is to pelletize seeds]. *Priusadebnoe khozyaystvo*. 1986; 5: 33. (In Rus.)
2. Kurzenkov S.V., Mikheev D.A. Progressivnyye tekhnologii i oborudovaniye dlya drazhirovaniya semyan [Progressive technologies and equipment for seed coating]. *Nauchno-tekhnicheskyy progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Minsk, October 21-22, 2015): NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva*. 2015; 2: 123-129. (In Rus.)
3. Mikheev D.A. Sposoby drazhirovaniya semyan [Methods of seed coating]. *Molodezh' i innovatsii-2013: Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh (Gorki, May 29-30, 2013)*. 2013; 2: 19-21. (In Rus.)
4. Corlett F.M.F., Rufino C.A., Vieira G.F., Tavares L.C., Tunes L.V.M., Barros A.C.S.A. The influence of seed coating on the vigor and early seeding growth of barley. *Ciencia e Investigacion Agraria*. 2014; 41(1): 129-130. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000100013>
5. Guter R.S., Ovchinsky B.V. Elementy chislennogo analiza i matematicheskoy obrabotki rezul'tatov opyta [Elements of numerical analysis and mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka, 1970. 367 p. (In Rus.)
6. Spirina M.S., Spirin P.A. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of probability and mathematical statistics]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Akademia, 2013. 352 p. (In Rus.)
7. Shakhmatov V.P. Razrabotka elementov promyshlennoy tekhnologii vyrashchivaniya rassady ovoshchnykh kul'tur s ispol'zovaniyem drazhirovaniykh semyan [Development of elements of industrial technology for growing seedlings of vegetable crops using pelleted seeds: PhD (Ag) thesis. Moscow, 1983. 206 p. (In Rus.)
8. Hartman K., Letsky E., Shaefer V. Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Experimental planning in the study of technological processes]. Moscow, Mir, 1977. 522 p. (In Rus.)
9. Daniel K. Primenenie statistiki v promyshlennom eksperimente [Application of statistics in industrial experiment making]. Moscow, Mir, 1979. 299 p. (In Rus.)

#### Contribution

S.A. Andreev performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.A. Andreev has author's rights and is responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 29.03.2022

Approved after reviewing 30.07.2022

Accepted for publication 01.08.2022