

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Д. А. Михеев

**ДРАЖИРОВАНИЕ СЕМЯН  
САХАРНОЙ СВЕКЛЫ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ДРАЖИРАТОРОМ  
С ЛОПАСТНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ**

*Монография*

Горки  
БГСХА  
2017

УДК 631.53.01:631.53.027.2

**Михеев, Д. А.** Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем / Д. А. Михеев. – Горки : БГСХА, 2017. – 180 с. : ил.  
ISBN 978-985-467-733-0.

В монографии приведен обзор существующих конструкций для создания искусственных оболочек на поверхности семян. Представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса дражирования семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем.

Монография предназначена для научно-технических работников, аспирантов, магистрантов, студентов инженерно-технических специальностей.

Табл. 18. Ил. 64. Библиогр.: 139 назв.

Печатается по решению Научно-технического совета  
УО «Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия».  
Протокол № 3 от 15.03.2017 г.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства» Л. Я. Степук;  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
сельскохозяйственных машин УО «Белорусский государственный  
аграрный технический университет» В. П. Чеботарев

**ISBN 978-985-467-733-0**

© Михеев Д. А.

© УО «Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия», 2017

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a_c$  – ускорение семени,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $\beta$  – угол наклона лопасти отражателя, рад;  
 $D_k$  – диаметр камеры смешивания, м;  
 $f$  – коэффициент трения частицы о поверхность рабочего органа;  
 $F_{\text{рез}}$  – результирующая сила, Н;  
 $F_c$  – сила сопротивления движению материальной точки, Н;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $h_{\text{отр}}$  – высота лопасти отражателя, м;  
 $H_{\text{дн}}$  – высота дна дражиратора, м;  
 $H_{\text{от}}$  – высота расположения лопастного отражателя, м;  
 $H_{\text{рас}}$  – высота расположения распылителя в камере смешивания, м;  
 $\kappa_{\text{от}}$  – количество лопастей в отражателе, шт.;  
 $l_{\text{отр}}$  – длина лопасти отражателя, м;  
 $m_c$  – масса семени, кг;  
 $N$  – нормальная реакция опоры, Н;  
 $P$  – сила тяжести, Н;  
 $Q_{\text{ж}}$  – расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $Q_{\text{др}}$  – производительность дражиратора, кг/ч;  
 $R_{\text{дн}}$  – радиус большего основания дна, м;  
 $r_{\text{дн}}$  – радиус меньшего основания дна, м;  
 $r_{\text{рас}}$  – радиус распылителя, м;  
 $t_{\text{об}}$  – время обработки семян, с;  
 $v$  – коэффициент загрузки камеры смешивания, %;  
 $V_{\text{дн}}$  – объем дна,  $\text{м}^3$ ;  
 $V_c$  – скорость семени, м/с;  
 $\theta$  – конусность дна камеры смешивания, рад;  
 $\omega$  – угловая скорость вращения дна дражиратора, рад/с;  
 $\omega_{\text{рас}}$  – угловая скорость вращения распылителя, рад/с.

## ВВЕДЕНИЕ

Решение продовольственной проблемы, повышение рентабельности производства сельскохозяйственной продукции – важнейшие задачи АПК. Для их исполнения необходимо использовать все возможности повышения урожайности сельскохозяйственных культур при снижении затрат на их производство. Урожайность же зависит не только от технологий возделывания сельскохозяйственных культур, но и от качества посевного материала и способов его подготовки к посеву.

Государственной программой развития селекции и семеноводства Республики Беларусь предусмотрено обеспечение страны высокопродуктивными сортами семенного материала зерна, картофеля, сахарной свеклы, рапса и создание прочной кормовой базы для животноводства. Это, в свою очередь, позволит решить вопрос продовольственной безопасности страны и создать основы ее экономического роста.

Производство сахарной свеклы в Республике Беларусь к концу 2015 г. планировалось увеличить до 5,5 млн. тонн, а объем выработки сахара из свекловичного сырья – до 720 тыс. тонн. Такие параметры устанавливались Государственной программой развития сахарной промышленности на 2011–2015 годы, которая утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 марта 2011 г. № 359 [79].

Увеличение объемов производства сахарной свеклы и уменьшение затрат на ее производство планировалось обеспечить за счет роста ее урожайности, в том числе путем использования высококачественных семян, прошедших целый комплекс предпосевной обработки. Предпосевная обработка семян позволяет улучшить их всхожесть и прорастание и тем самым существенным образом повлиять на урожайность, качество и себестоимость конечной продукции [5, 25, 27, 32, 34, 42, 45, 51, 52, 61, 63, 65, 66, 72, 77, 97, 101, 125, 121].

Использование посевного материала низкого качества снижает урожайность и приводит к перерасходу семян. При посеве мелких или имеющих неровную поверхность семян, таких как семена сахарной свеклы, трудно соблюсти заданную норму и равномерность высева, что приводит к необоснованному перерасходу в 1,5–2 раза семенного материала.

Урожайность сельскохозяйственных культур также напрямую свя-

зана с обеспечением питания растений по фазам развития, защиты их от болезней, вредителей и стимулирования устойчивости к неблагоприятным условиям. Как правило, питание растений обеспечивается за счет внесения удобрений, а защита и жизнеспособность – за счет внесения пестицидов. Большие дозы вносимых удобрений и пестицидов загрязняют окружающую среду и приводят к удорожанию продукции растениеводства. Одним из решений этой проблемы является внесение питательных и защитных веществ в состав оболочки на поверхности семян при подготовке их к посеву путем дражирования, более известного как способ для увеличения размеров и массы семян [32, 42, 65, 128]. Этот способ обработки семян позволяет решить ряд задач: 1) придать семенам правильную форму необходимого размера; 2) учесть особенности культуры, ее потребности в питательных веществах; 3) уменьшить количество удобрений и пестицидов, вносимых в почву.

Дражирование широко применяется за рубежом на семенах различных культур, в том числе и на семенах сахарной свеклы. Основная масса дражированных семян сахарной свеклы, используемых в Республике Беларусь для промышленного высева, импортного производства. Это обусловлено тем, что получить высококачественные семена в условиях климата Республики Беларусь не представляется возможным, также отсутствует собственная технология дражирования и соответствующее оборудование.

Необходимо отметить, что разработка технологии дражирования является одним из направлений стратегии технологического развития Республики Беларусь, разработанной в соответствии с подпунктом 1.1.2 пункта 1 протокола поручений Президента Республики Беларусь от 21 мая 2010 г. № 13. При разработке стратегии учтены основные положения Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2011–2015 годы.

В настоящее время под сахарную свеклу в Республике Беларусь отводится более 100 000 га посевных площадей. Стоимость одной посевной единицы импортных дражированных семян сахарной свеклы составляет от 70 до 140 евро. С учетом развития логистических возможностей можно получить недражированные семена сахарной свеклы отечественных сортов в условиях благоприятного климата, цена которых будет составлять не более 25 евро за одну посевную единицу, а качество этих семян будет сопоставимо с импортными аналогами. Остается решить вопрос о технологии и оборудовании для дражирова-

ния семян. Цена импортного серийно выпускаемого оборудования для дражирования семян составляет более 27 тыс. евро [134], что является значительным барьером для широкого использования этого оборудования в Республике Беларусь. Внедрение отечественной технологии дражирования семян сахарной свеклы с созданием необходимого оборудования по доступной цене в рамках программы импортозамещения позволит снизить себестоимость получения семенного драже. Снижение себестоимости обработки, использование отечественных сортов семян, полученных в условиях благоприятного климата, а также тот факт, что семена будут обрабатываться в Республике Беларусь, дадут общий эффект в снижении стоимости дражированных семян сахарной свеклы более чем на 30 %. Отечественная технология дражирования семян сахарной свеклы даст толчок в развитии этого способа обработки семян других сельскохозяйственных культур.

# **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Актуальность предпосевной обработки семян сахарной свеклы**

Семена являются переносчиками грибов, бактерий и вирусов, часть из которых может стать источником болезней растений. Болезни, переносимые семенами на растения, а также насекомые могут оказать негативное влияние на будущий урожай. Почва без санитарной обработки также содержит грибы и другие организмы, повреждающие семена и ростки. Насекомые могут повреждать семена в хранилищах или после высева их в почву.

Повреждение семян насекомыми в процессе хранения может потребовать проведения их защитной обработки до высева. После высева почвенные насекомые могут пагубно воздействовать на семена и на их ростки, особенно в холодных и влажных условиях, препятствующих быстрым всходам и интенсивному росту.

Предпосевная обработка семян – это применение биологических, физических и химических средств (веществ), а также способов их нанесения (воздействия) на семена, обеспечивающих защиту семян и растений от болезней и вредителей. Обработка семян перед посевом всегда имела огромное значение на протяжении всей истории земледелия, а в настоящее время способствует увеличению урожая и их качества во всем мире. Первые упоминания о предпосевной обработке семян относятся к 2000 г. до н. э. В те времена для защиты семян от насекомых в процессе хранения применяли мятые листья кипариса, а также сок лука.

Урожайность и качество сахарной свеклы, а в результате выход сахара зависят от природных условий, сорта и проводимых агротехнических мероприятий. По мнению немецких авторов (В. Ольтман, Д. Шпар и др.), средние доли зависимости действия различных факторов на урожай сахарной свеклы таковы: погодные условия – 34 %, место выращивания – 17 %, сорт – 14...16 % и агротехнические мероприятия – 35 % [18]. Проанализировав вышесказанное, можно сделать вывод о том, что агротехнические мероприятия, в которые входит предпосевная обработка семян, являются одними из самых важных факторов при возделывании сахарной свеклы.

Для получения высокого урожая сахарной свеклы необходимо ис-

пользовать для посева семена с высокими сортовыми и посевными качествами. Предпосевная обработка семян улучшает всхожесть, защищает семена от возбудителей болезней, повышает их жизнеспособность и делает их прорастание более быстрым, что существенно образом влияет на урожайность, качество и себестоимость конечной продукции, от которых зависит рентабельность отрасли [96, 125].

Показатели всхожести семян сахарной свеклы различны, это связано с существованием зависимости между всхожестью и размерами, плотностью семян, наличием у них травм, степенью зрелости. Именно поэтому почти в каждой партии бывают семена всхожие, ослабленные и невсхожие. Как правило, проблема отбора семенного материала с лучшими посевными качествами решается при его сортировке и калибровке.

В период формирования, созревания и хранения семена становятся носителями внутренней и внешней микрофлоры, как сдерживающей процессы роста и развития растения, так и благотворно влияющей на эти процессы. Причем каждый вид микроорганизмов специфичен для определенной группы семян, переходит с них на проростки, а затем и на растения [4, 41, 71, 73]. Для борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур производится обеззараживание семенного материала химическими и биологическими способами [38, 41, 45, 58, 59, 72, 93, 102].

Во время хранения происходит замедление процессов развития семени как биологического объекта. Для того чтобы «разбудить» эти процессы, семенной материал должен оказаться в определенных климатических условиях. Этого можно достичь за счет активации семян – воздействия физическими факторами и обработки химическими веществами, стимулирующими прорастание и начальные ростовые процессы. Суть этого процесса состоит в том, что необходимо оказать воздействие на физиолого-биохимические процессы в семени и развивающемся ростке с целью активизации в них обмена веществ.

Размеры и конфигурация семян сахарной свеклы различны. При посеве мелких семян и семян неправильной формы равномерное распределение их по засеваемому полю затрудняется. Решить данную проблему возможно за счет искусственного наращивания оболочек на поверхности семян [32, 45, 65, 66, 80, 81].

В настоящее время ведущие зарубежные фирмы сельскохозяйственного направления совершенствуют различные способы предпосевной обработки семян сахарной свеклы для повышения ее урожай-

ности и сокращения затрат при возделывании. Выбор наиболее эффективных способов подготовки семян к посеву возможен на основе учета комплекса биохимических и биофизических особенностей развития растений. Для получения максимального результата необходимо определить совокупность и последовательность способов предпосевной обработки семян.

### **1.1.1. Семена как биологические объекты развития**

Семя представляет собой живой организм, в обычных условиях находящийся в состоянии покоя. Все процессы в семени подчинены регулируемому воздействию его биологической системы, что обеспечивает их развитие.

При высеве семя потребляет на разных этапах роста различные микроэлементы из почвы. Недосток любого микроэлемента приводит к нарушению обмена веществ и физиологических процессов у растений, ухудшению их роста и развития, снижению урожая и его качества. При остром дефиците элементов питания у растений появляются характерные признаки голодания. Вследствие этого при высеве характерных культур (сахарной свеклы и др.) необходимо исследовать плодородие почвы, содержание в ней микроэлементов и рассчитать дозу внесения удобрений на разных фазах развития растения.

Рассмотрим влияние основных микроэлементов, применяемых в сельском хозяйстве, на развитие растения.

Азот входит в состав белков, ферментов, нуклеиновых кислот, хлорофилла, витаминов, алкалоидов.

Уровень азотного питания определяет интенсивность синтеза белка и других азотистых органических соединений в растениях и, следовательно, ростовые процессы. Недосток азота особенно резко отражается на росте вегетативных органов. Слабое формирование фотосинтезирующего листового и стеблевого аппарата вследствие дефицита азота, в свою очередь, ограничивает образование органов плодоношения и ведет к снижению урожайности и уменьшению количества белка в продукции.

Фосфор играет исключительно важную роль в процессах обмена энергии в растительных организмах. Энергия солнечного света в процессе фотосинтеза и энергия, выделяемая при окислении ранее синтезированных органических соединений в процессе дыхания, аккумулируется в растениях в виде энергии фосфатных связей у так называемых макроэргических соединений, важнейшим из которых является адено-

зинтрифосфорная кислота (АТФ). Накопленная в АТФ при фотосинтетическом и окислительном фосфорилировании энергия используется для всех жизненных процессов роста и развития растения, поглощения питательных веществ из почвы, синтеза органических соединений, их транспорта. При недостатке фосфора нарушается обмен энергии и веществ в растениях.

Калий участвует в процессах синтеза и оттока углеводов в растениях, обуславливает водоудерживающую способность клеток и тканей, влияет на устойчивость растений к неблагоприятным условиям внешней среды и поражаемость культур болезнями.

Необходимо отметить, что содержание данных микроэлементов в почве для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур недостаточно, поэтому существует необходимость внесения удобрений.

Анализ литературных источников показывает, что, как живой организм, семя отзывается на любое внешнее воздействие (водой, давлением, температурой и др.). Степень же этих преобразований зависит от параметров воздействия, а также от индивидуальных свойств самого семени [65, 66]. Изменение посевных свойств семени в процессе обработки происходит в результате не только физико-химических воздействий, но и биохимических.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что семена нуждаются в различных способах обработки для активизации их жизненных способностей, роста и защиты. Меры воздействия на семена и способы их проведения зависят от культуры, а также условий ее произрастания. Необходимо отметить, что наибольший эффект достигается при совокупности методов обработки семян. Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются химический и биохимический методы воздействия. Это обусловлено тем, что для каждой культуры можно подобрать индивидуальную химическую защиту от неблагоприятных факторов окружающей среды, а также выбрать индивидуальную биологическую подкормку растения на ранних этапах роста путем нанесения удобрений на поверхность самого семени.

## **1.2. Анализ существующих способов предпосевной обработки семян сахарной свеклы**

Анализ априорной информации показывает, что для повышения посевных показателей семян в странах Западной Европы, США и др.

достаточно широко используются различные способы обработки семян перед посевом [129, 131, 132, 133, 135, 137, 139].

Способы предпосевной обработки отличаются между собой по воздействию на семена. Они имеют различную эффективность и направленность. Наибольший положительный эффект достигается при правильном выборе совокупности способов предпосевной обработки.

Перед тем как применять предпосевную обработку, семена сахарной свеклы сушат и очищают от примесей. Среди известных способов подготовки семян свеклы к посеву наиболее широкое применение в сельскохозяйственной практике получили: сортирование (калибровка); обеззараживание (протравливание); скарификация; намачивание; барботирование; инкрустация; дражирование (рис. 1.1).

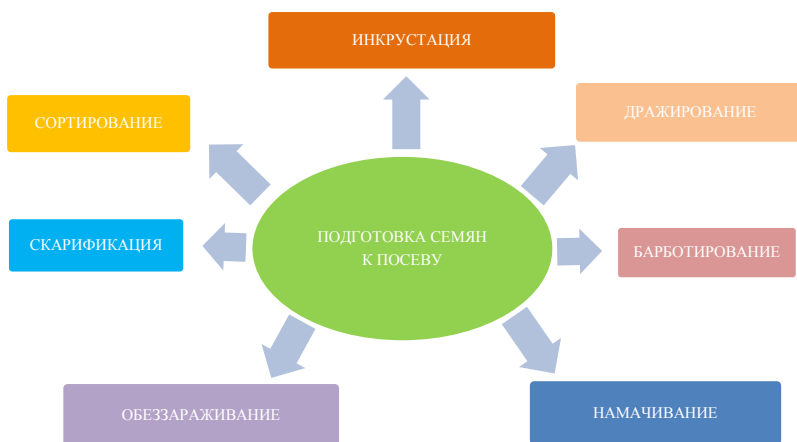


Рис. 1.1. Способы подготовки семян свеклы к посеву

*Сортирование* – это способ разделения семян на сорта по различным признакам: аэродинамическим свойствам, размерам и др. Наиболее распространенным способом сортирования является калибровка семян по линейным размерам (длине, ширине, толщине). В производственных условиях для сортирования семян по линейным размерам используют решетно-триерные машины Petkus K 541, Petkus K-531/1, МС-4,5 и др. (рис. 1.2). В этих машинах сепарация по линейным размерам осуществляется с помощью системы решет [2, 75, 95, 103].



*a*



*б*



*в*

Рис. 1.2. Решетно-триерные машины:  
*a* – Petkus K 541; *б* – MC-4,5; *в* – Petkus K-531/1

В настоящее время все большее применение находит способ электросепарации семян, который основан на использовании электрических свойств семян: электропроводности, диэлектрической проницаемости, способности воспринимать и отдавать заряд [12, 24, 105, 127]. Электрические свойства семян зависят от их химического состава. В связи с этим с помощью электросепарации можно выделить семена с определенными качествами, что невозможно при использовании, например, сортирования по размерам. На проведение электросепарации требуется меньше времени, семена практически не травмируются, в некоторых случаях отмечается стимулирующий эффект электрического воздействия.

*Скарификация* – частичное нарушение целостности твердой водо-

непроницаемой оболочки семян с целью облегчения их набухания и прорастания и увеличения процента всхожести. Различают термическую, химическую и механическую скарификацию. При термической скарификации семена помещают сначала в кипяток, затем в ледяную воду. Процедуру повторяют несколько раз. Оболочка семени постепенно разрушается, внутрь проникает влага, и весной, при наступлении постоянных положительных температур, семя прорастает.

При химической скарификации оболочку размягчают, воздействуя на нее концентрированными кислотами [90].

При механической скарификации (рис. 1.3) оболочка семени подвергается воздействию рабочего органа шлифовальной машины. Необходимо отметить, что механическая скарификация нашла более широкое применение для обработки семян сахарной свеклы.



Рис. 1.3. Скарификатор семян СКР-300

Преимущество скарификации состоит в том, что семена быстрее прорастают, это дает возможность полностью созреть растению при недостаточно благоприятных условиях окружающей среды. Недостатком является повышенная вероятность повреждения семян в результате внешнего воздействия на них.

*Намачивание* – погружение семян в жидкие растворы (воду) до полного их набухания. Это ускоряет появление всходов, получение раннего урожая. Намачивание повторяют несколько раз. После каждого намачивания семена необходимо просушить до влажности, не пре-

вышающей 14 %. Наблюдаемый эффект после обработки – это ускорение прорастания семян и повышение устойчивости растений к засухе [14, 45, 88, 97, 125, 128].

*Барботирование* – обработка семян в воде, насыщаемой кислородом. Барботирование позволяет резко ускорить появление всходов и повышает всхожесть семян. Суть метода барботирования семян заключается в выдерживании их в воде, постоянно аэрируемой путем подачи кислорода или воздуха [8, 97, 125]. Максимальный эффект достигается при полном погружении семян в воду, насыщаемую кислородом, и постоянном их перемешивании.

К недостаткам намачивания и барботирования относится то, что эти типы предпосевной обработки требуют больших затрат времени и энергии.

*Обеззараживание* – защита семян от переноса болезней и вредителей на растения вместе с семенами. Обеззараживание предупреждает проникновение патогенных микроорганизмов в ткани семян в период хранения, повышает их энергию прорастания и всхожесть, предотвращает занос возбудителей заболеваний с семенным материалом. Наличие патогенной микрофлоры на семенах снижает их полевую всхожесть и увеличивает число заболеваний растений. Чтобы предотвратить перенос болезней и вредителей на растения вместе с семенами, проводят термическую обработку и обеззараживание ядохимикатами [41, 52, 66, 71, 72, 131].

Обработка семян перед посевом химическими веществами в целях защиты их от вредителей и болезней, а также стимулирование прорастания отличается высокой эффективностью. В настоящее время используется более 500 химических препаратов, которые воздействуют на семена сахарной свеклы, в первую очередь защищают семена от болезней и вредителей, а также стимулируют их рост и развитие. Химические вещества делятся на протравители и микроэлементы. Задача протравителей – защищать семена от патогенной микрофлоры и вредителей, они являются фунгицидами и инсектицидами. Задача микроэлементов – стимулировать развитие растения, особенно на ранней стадии [23, 51, 52, 58, 59, 71, 72, 97, 125]. Наиболее распространенным способом предпосевной обработки семян является химическое протравливание. Обеззараживание посевного материала от вирусных, грибковых и бактериальных заболеваний производится путем смачивания или опыливания семян различными ядохимикатами. Часто протравливание имеет комплексное воздействие на семена, дезинфицируя

их и в дальнейшем стимулируя процессы роста растений. В зависимости от форм препаратов, свойств, назначения, обрабатываемой культуры, состояния семян, вида патогена и степени зараженности применяются следующие способы протравливания семян.

*Сухое протравливание* заключается в равномерном нанесении на поверхность семян сухих порошкообразных препаратов. Достоинство способа – простота осуществления. Недостатки – низкая эффективность уничтожения инфекций из-за плохого контакта препарата с поверхностью семян, плохая удерживаемость, неблагоприятные санитарно-гигиенические условия труда исполнителей и загрязнение окружающей среды.

*Полусухое протравливание* представляет собой нанесение на поверхность семян водных суспензий или растворов пестицидов. Достоинство способа – высокая эффективность уничтожения инфекции. Недостатки – повышение влажности семян, значительная трудоемкость и низкая производительность.

*Мокрое протравливание* предполагает обильное увлажнение или замачивание семян в жидком (раствор, суспензия, эмульсия) препарате с последующим томлением в течение 2 часов. Достоинство способа – высокая эффективность уничтожения инфекции. К недостаткам можно отнести неблагоприятное воздействие некоторых химических соединений на саму зерновку.

*Протравливание с увлажнением* заключается в нанесении на поверхность семян суспензий, растворов порошкообразных препаратов с одновременным или последующим смачиванием жидкостью. Достоинства способа – экономное расходование препарата за счет хорошего дозирования жидкости, возможность нанесения одновременно с пестицидами микро- и макроудобрений, небольшое увлажнение семян и отсутствие необходимости в их последующей сушке. Недостатки – относительная сложность выполнения процесса, снижение удерживаемости препарата на поверхности семян по мере его высыхания.

*Протравливание с покрытием пленкообразующими составами* состоит в нанесении на поверхность семян пестицидов в пленкообразующих составах, создающих вокруг них прочную оболочку, фиксирующую препараты на длительное время. Достоинства способа – исключается осыпание защитно-стимулирующих веществ с поверхности семян при погрузочно-разгрузочных транспортных работах, длительном хранении, высеве, неблагоприятной погоде и смешивании в переувлажненной почве; исключается выброс вредных веществ в окружа-

ющую среду; улучшается всхожесть и энергия прорастания. Недостатки – относительная сложность выполнения процесса, отсутствие необходимого протравливающего оборудования.

Протравливание семенного материала выполняется с помощью специальных машин, имеющих различные конструкции смешивающих устройств. В настоящее время существуют следующие машины, которые широко используются в Республике Беларусь: ПСШ-5, ПС-10АМ, ПС-20, Mобitох-super и др. (рис. 1.4) [2, 43, 99, 100].



Рис. 1.4. Протравливатели семян:  
а – ПСШ-5; б – ПС-10АМ; в – ПС-20; г – Mобitох-super

*Инкрустирование* – способ, посредством которого на поверхность семян наносится жидкий состав на основе создающего защитную среду водного раствора пленкообразователя, в который введены вещества, стимулирующие рост и развитие растений. Эти вещества закрепляются в оболочке на поверхности семян, обеззараживают их, закрывают ме-

ста микротравм, изолируют их от патогенной микрофлоры почвы, уменьшают потери биологически активных веществ с поверхности семян [82, 125].

Инкрустирование предполагает равномерное нанесение материала на поверхность семян без изменения их формы и размеров. При этом происходит незначительное увеличение массы семян (от 0,5 до 5 %). Жидкая субстанция, включающая пленкообразующий полимер и растворенные в нем вещества, впрыскивается со строго контролируемой частотой в массу перемешивающихся семян для однородного распределения материала на их поверхности. Чаще всего в состав жидкой субстанции для ускорения прорастания семян включают ауксины, гетероауксины и другие регуляторы роста [10, 13, 25, 27, 34, 50, 98].

*Дражирование* – способ предпосевной подготовки семян посредством создания защитно-питательной оболочки шаровидной формы (рис. 1.5).

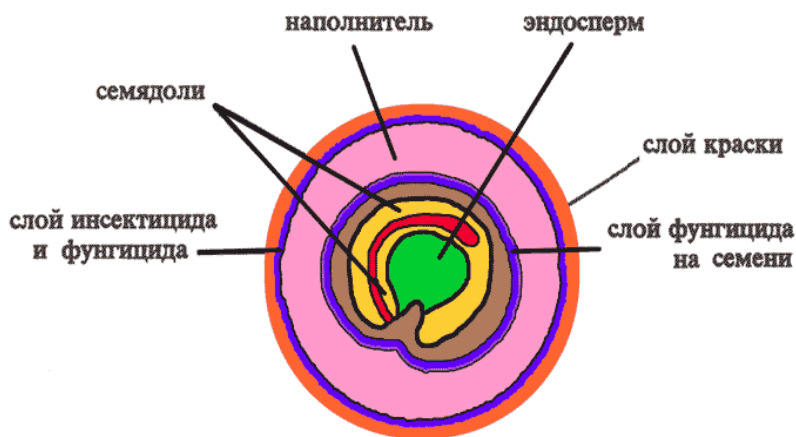


Рис. 1.5 Семенное драже свеклы

Этот способ предполагает значительное изменение формы и увеличение размеров семени. Масса семени в зависимости от потребности во включаемых в оболочку питательных, стимулирующих рост и развитие, а также защитных веществах и требований по гранулометрическому составу конечного продукта, облегчающему его высев, может быть увеличена в несколько раз [42, 45, 57, 65, 107, 125, 128, 130, 136, 138].

К посеву семена сахарной свеклы готовят на семенных заводах, где после сушки, очистки их калибруют и шлифуют, а затем дражируют. После дражирования семена разделяют на две фракции: основную (3,5...4,5 мм) и дополнительную (4,5...5,5 мм) [18, 19, 80, 89].

Для дражирования семян применяют специализированные смеси, в которых содержатся: суперфосфат, азотные, калийные и бактериальные удобрения, микроэлементы, стимуляторы роста и др. [65]. Дражированные семена могут храниться 6–9 месяцев, не теряя всхожести [125]. Дражирование позволяет закрепить несколько компонентов слоями: протравитель, регулятор роста, микроэлементы и др. Эффективность дражирования оценивается размером получаемого семенного драже, однородностью нанесенной оболочки и ее прочностью.

В результате применения дражирования достигается высокий разносторонний эффект: защита растений от патогенной флоры, повышение всхожести семян, повышение устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды, увеличение массы и объема семени, что улучшает условия высева.

Использование дражированных семян способствует экономии посевного материала, позволяет значительно повысить уровень механизации работ на севе и при уходе за растениями, так как обеспечивает равномерный высев семян неправильной формы, сокращает затраты труда на прореживание посевов, их подкормку и междурядную обработку. В свою очередь, это существенно облегчает возделывание растений, улучшает условия их роста.

Преимущество дражирования заключается еще и в том, что меньше загрязняется окружающая среда, так как определенная доза удобрений наносится на сами семена, что сокращает внесение удобрений в почву.

Даже с учетом того, что стоимость дражированных семян в 2–3 раза выше стоимости обычных семян, перечисленные преимущества дают значительный эффект при производстве сельхозпродукции (рис. 1.6). Использование дражированных семян также позволяет повысить урожайность посевов на 20...40 % [49, 65, 125]. Причем данный эффект наиболее ощутим при дражировании семян с высокой всхожестью, полученных в условиях благоприятного климата.

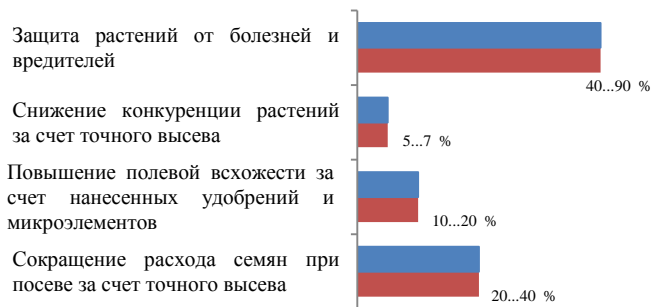


Рис. 1.6. Преимущества дражированных семян (% по отношению к необработанным семенам)

Таким образом, дражирование как способ предпосевной обработки семян обладает большим потенциалом для достижения высокого урожая, а также несомненным преимуществом по сравнению с традиционными способами. Особенно этот способ эффективен для обработки семян свеклы, поскольку они имеют неправильную форму (рис. 1.7), вследствие чего их высев затруднен сеялками точного высева.



Рис. 1.7. Семена сахарной свеклы

Дражирование как процесс имеет ряд нерешенных вопросов:

- дражирование как способ предпосевной обработки семян мало изучен в Республике Беларусь;
- отсутствует отечественное оборудование для осуществления этого способа обработки;

– отсутствуют четкие рекомендации по применению способа дражирования.

На основании этого можно сделать вывод о том, что совершенствование процесса дражирования как способа предпосевной обработки семян, а также создание отечественного оборудования является актуальной задачей для условий Республики Беларусь.

### **1.3. Способы нанесения искусственных оболочек на поверхность семян**

Способ создания искусственных оболочек семян путем обволакивания их удобрениями был известен давно. Дражирование семян в его простейшем виде пытались использовать еще в древнем Египте, обрабатывая семена культур соком лука, который, высыхая, образовывал оболочку вокруг семени. В средние века для этих целей применяли жидкий навоз и соли хлорной кислоты. С начала XVII в. известна обработка семян соленой водой, а первые препараты на основе меди стали внедрять в практику сельского хозяйства Западной Европы с середины XVIII в.

В России крестьяне намачивали семена в навозной жиже, а затем опудривали их древесной золой и перегноем. В 1779 г. А. Т. Болотов установил, что обволакивание семян древесной золой повышало устойчивость хлебов к полеганию и значительно увеличивало урожай [45]. На постсоветском пространстве исследования по дражированию семян были выполнены профессором А. В. Петербургским в 1951 г. Для дражирования семян сахарной свеклы он рекомендовал смесь перегноя. Дражированием как эффективным промышленным способом обработки семян ученые заинтересовались в 80-е гг. XX ст. Это связано с появлением системных фунгицидов – препаратов для борьбы с грибными болезнями растений, а также протравителей семян (формалин, ТМТД, фундазол, гранозан, меркуран). Позднее, в 90-е гг., на семена стали наноситься и инсектициды – химические препараты для уничтожения вредных насекомых [45, 73, 125].

При дражировании используются различные способы нанесения. Общий же принцип одинаков: на семена последовательно наносится один или несколько слоев различных веществ (питательных или защитных), основная масса которых инертна и нужна лишь для придания семенному драже необходимых размеров и правильной формы.

Процесс получения семенного драже сахарной свеклы можно представить следующим образом (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Этапы производства дражированных семян сахарной свеклы

Для получения качественного семенного драже очень важно подготовить исходный материал. Поэтому на предварительном этапе с целью обеспечения однородных показателей по геометрии и посевным качествам семян производят их очистку, шлифование и калибровку. Цель предварительной обработки – довести семена до такого состояния, которое позволяет исключить возможность снижения их всхожести и обеспечить наиболее эффективное проведение основной обработки (дражирования).

На основном этапе обработки на поверхности семени формируется защитно-питательная оболочка посредством дражирования. Причем дражирование позволяет создавать многослойное драже независимо от количества включаемых в него компонентов. Необходимая форма и размеры семенного драже обеспечиваются дозировкой компонентов смеси и временем обработки при дражировании.

Существует три основных способа нанесения искусственных оболочек на поверхность семян: 1) дражирование наслаиванием; 2) пресование гранул; 3) выдавливание (штамповка) таблеток [64, 65].

*Дражирование семян насливанием* производится следующим образом. Отсортированные и откалиброванные семена помещают в камеру смешивания дражиратора, где смачивают связующей жидкостью. На поверхности каждого семени образуется тонкая пленка жидкости. Не допускается переувлажнение семян. Они должны свободно отделяться друг от друга. Излишнее их увлажнение ведет к взаимному прилипанию, в результате которого в драже попадает по два, а иногда и по три семени. При установившемся движении семян в дражираторе к ним небольшими порциями подают сухую смесь – наполнитель (бленду), которая прилипает к увлажненной поверхности семян. Образуется тонкий слой питательной оболочки. Последующее чередование процессов смачивания жидкостью и добавления наполнителя производится до тех пор, пока не сформируются драже правильной формы и требуемого размера. В результате активного движения драже в камере смешивания происходит уплотнение и формирование их оболочки.

*Метод штамповки таблеток*, практикующийся в США и Японии, базируется на использовании машин, применяемых в фармацевтической промышленности для получения таблеток. Драже получают путем подачи под большим давлением пастообразной смеси наполнителя через круглое отверстие в матрицу [65]. Штамповка предусматривает использование матриц, имеющих множество полусферических ячеек диаметром, равным диаметру оболочек. Матрицы закреплены на транспортной ленте, при движении которой в ячейки последовательно закладываются материал оболочки, семена и вновь материал оболочки, поверх которого накладывается штамп в виде такой же матрицы с ячейками. Прессование оболочек ведется под давлением. Метод штамповки таблеток пригоден для многих семян сельскохозяйственных культур, в том числе и для семян сахарной свеклы. При этом оболочки получают выполненными точно по размерам и не нуждаются в дальнейшей калибровке. Для осуществления этого метода нужно очень точно дозировать компоненты оболочки и создавать оптимальное давление при прессовании. Необходимо отметить, что метод штамповки таблеток имеет свои недостатки: 1) семена подвергаются значительному давлению в процессе обработки; 2) оборудование не является универсальным, так как требует больших затрат для наладки на другой тип семян или другой размер оболочек, поэтому оно рекомендуется для небольших партий семян.

*Метод дражирования прессованием гранул* широко применяется в США для обработки семян трав. Гранулы сферической формы полу-

чают путем выдавливания в компресс-машине. Размер драже зависит от крупности семян и колеблется от 6 до 9 мм. По сравнению с методом нашлаивания здесь наполнитель в массовом отношении значительно превосходит массу семян. При этом в грануле должно быть 3–25 семян. Исследователи считают, что этот метод дражирования предпочтительнее для обработки мелких семян шаровидной формы, которые меньше повреждаются при сильном давлении. Технология предполагает высокую автоматизацию процесса. Данный способ не подходит для обработки семян сахарной свеклы, поскольку в грануле содержится несколько семян, что затрудняет их точный высев, кроме этого следует отметить и общие недостатки данного метода: 1) не обеспечивается однородное покрытие семян; 2) в процессе обработки семена могут повреждаться; 3) велика вероятность получения пустого драже [65].

Необходимо отметить, что наиболее широкое распространение на практике получил метод дражирования семян путем постепенного нашлаивания оболочки. Благодаря этому методу можно получить многослойную оболочку с различными по составу компонентами каждой оболочки, а это несомненное преимущество по сравнению с другими способами. Метод дражирования семян нашлаиванием является универсальным и наиболее подходящим для обработки семян сахарной свеклы, поскольку данным способом можно обрабатывать семена различных размеров и формы и получать готовое семенное драже правильной формы определенного размера. Также следует отметить, что стоимость оборудования для получения драже методом нашлаивания меньше, чем стоимость оборудования, используемого при других методах.

#### **1.4. Машины и оборудование для создания питательных и защитных оболочек на семенах**

В настоящее время существуют различные машины и оборудование для создания защитных оболочек на семенах. В большинстве серийных машин для дражирования (дражираторах) используется способ нашлаивания. Дражираторы можно классифицировать по следующим признакам (рис. 1.9) [3, 46, 47, 91, 125]:

- по принципу действия: периодического и непрерывного действия;
- по частоте вращения рабочих органов: тихоходные и быстроходные;

- по расположению оси вращения рабочих органов: вертикальные, горизонтальные и наклонные;
- по типу рабочих органов: барабанные, шнековые, вибрационные, с вращающимся дном (центробежные), штамповочные.

Каждое исполнение имеет свои достоинства и недостатки.



Рис. 1.9. Классификация дражировщиков

Независимо от способов обработки все дражировщики должны удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать качество производимого семенного драже, соответствующее действующим стандартам; соответствовать требованиям техники безопасности и санитарно-гигиеническим требованиям; обладать достаточной надежностью [67].

В настоящее время в странах СНГ производство дражированных семян не приняло масштабных объемов, а применяемое оборудование является больше экспериментальным, поэтому рассмотрим конструкции дражировщиков, производимых за рубежом, и некоторые экспериментальные схемы.

Наиболее распространенной в пищевой и фармацевтической промышленности является конструкция дражировщика с установленным под углом барабаном (рис. 1.10) [6].

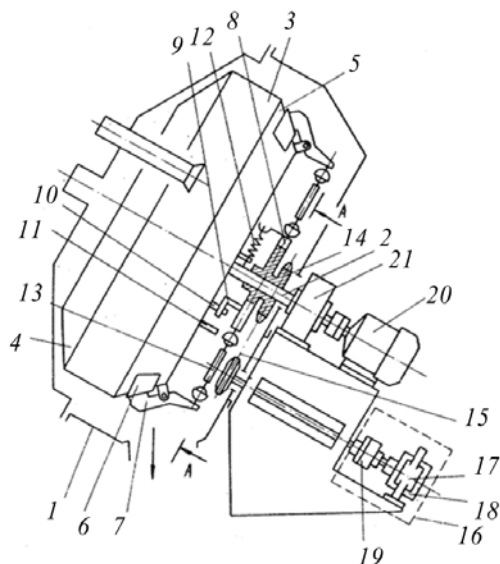


Рис. 1.10. Схема дражироватора с наклонным барабаном:  
 1 – кожух; 2 – приводной вал; 3 – рабочий орган;  
 4, 5 – усеченный конус; 6 – крышка;  
 7 – двуплечий рычаг; 8 – диск; 9, 10, 11 – упор; 12 – пружина;  
 13 – тяга; 14 – приводная звездочка; 15 – цепная передача;  
 16 – тормоз; 17 – электромагнитное устройство; 18 – шкив;  
 19 – предохранительная муфта; 20 – электродвигатель; 21 – редуктор

Дражироватор можно охарактеризовать: по принципу действия – периодического действия; по типу рабочих органов – барабанный; по расположению оси вращения рабочих органов – наклонный; по частоте вращения рабочих органов – тихоходный.

Он работает следующим образом: семена помещают в барабан дражироватора, при вращении которого они поднимаются, перекатываясь, до определенного уровня и под действие силы тяжести падают обратно. Поэтапно в барабан подаются микроэлементы и удобрения. Под воздействием адгезии происходит наслаивание удобрений и микроэлементов на поверхность семени. В результате происходит постепенное увеличение толщины оболочки семени и получается драже правильной формы.

По такому принципу работает серийно выпускаемое оборудование: дражировочная машина СВА-4А (Польша), дражировочный барабан ДР-51 (Россия) (рис. 1.11) [28, 33].

Дражировочный барабан ДР-51 широко применяется в пищевой промышленности при производстве кондитерских изделий.



Рис. 1.11. Дражировочный барабан ДР-51

Необходимо отметить, что недостатками барабанных дражировщиков являются:

- низкая производительность;
- высокая энергоемкость процесса;
- проблема автоматизированной выгрузки готового драже.

С целью увеличения производительности данной конструкции дражировщика были предложены технические решения, которые представлены на схеме барабанного дражировщика (патент РФ 2189713) [31] (рис. 1.12).



Применение эластичного барабана, который деформируется при увеличении толщины восходящего и скатывающегося слоев, обеспечит свободное прохождение слоев между внутренней поверхностью барабана 3 и барабаном 12. Производительность дражирования при применении дополнительного барабана возрастет, однако проблема автоматизированной выгрузки остается актуальной.

Известна конструкция дражиратора с горизонтально расположенным барабаном (рис. 1.13), разработанная в Казанской сельскохозяйственной академии для оснащения технологической линии по промышленной обработке семян [20].

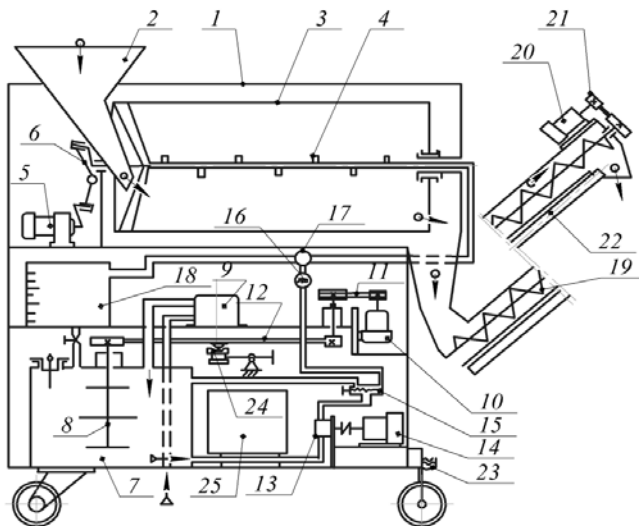


Рис. 1.13. Схема дражиратора с горизонтальным барабаном: 1 – рама; 2 – загрузочный бункер; 3 – камера смешивания; 4 – штанги с форсунками; 5 – привод барабана; 6 – рычажная передача; 7 – бак рабочей жидкости; 8 – мешалка; 9 – насос; 10 – электродвигатель; 11, 12 – ременные передачи; 13 – насос; 14 – электродвигатель; 15 – дозатор; 16 – манометр; 17 – кран; 18 – мерная емкость; 19 – транспортер; 20 – электродвигатель; 21 – ременная передача; 22 – канал отсоса воздуха; 23 – механизм наклона барабана; 24 – муфта; 25 – пульт управления

Технологический процесс состоит в следующем: семена из бункера 2 попадают в камеру смешивания 3, куда одновременно подается рабочая суспензия через форсунки 4 и наносится на поверхность се-

мян. При наклоне барабана семена перемещаются в осевом направлении, дражируются и выводятся из установки шнековым транспортером 19 в сушильную камеру.

Достоинством такого дражировщика является точность обработки и получение качественного семенного драже. К недостаткам можно отнести:

- сложность конструкции;
- невысокую производительность;
- высокую металлоемкость и энергоемкость оборудования.

Рассмотрим также конструкцию барабанного дражировщика, представленную на рис. 1.14 (патент РФ 2195099) [30]. Дражировщик включает в себя дражировочный барабан с направляющими, выполненный из двух камер: конической и закрепленной на ее торце тороидальной.

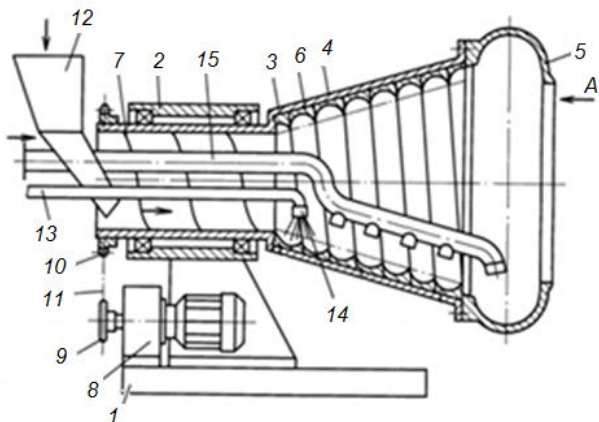


Рис. 1.14. Схема барабанного дражировщика: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – дражировочный барабан; 4 – коническая часть барабана; 5 – тороидальная часть барабана; 6 – спиральные направляющие; 7 – спиральные ребра; 8 – электропривод; 9, 10 – звездочки; 11 – цепь; 12 – дозатор; 13 – трубопровод жидких компонентов; 14 – форсунка; 15 – трубопровод теплого воздуха

Дражировщик работает следующим образом. Семенной материал из дозатора 12 подается внутрь цилиндрической части конической камеры 4. Связующий раствор по трубе 13 подается в форсунку 14 и рас-

пыляется на поданный спиральными ребрами 7 в начало конической камеры материал.

При вращении барабана семена перемещаются по спиральным направляющим 6, окружная скорость которых постепенно увеличивается. После прохождения конической камеры 4 семена поступают в тороидальную камеру 5 до накопления в ней необходимого объема. После этого подача материала из дозатора прекращается. В камере 5 производится окончательная обработка семян.

При перемещении в конической камере 4 и в тороидальной камере 5 семенные драже подсушиваются теплоносителем, поступающим по трубе 15.

Достоинством описанного дражироватора является получение семенного драже, не требующего дополнительного подсушивания. К недостаткам следует отнести:

- сложность конструкции;
- невысокую производительность;
- высокую металлоемкость и энергоемкость оборудования.

Далее рассмотрим конструкцию барабанного дражироватора, представленную на рис. 1.15 (патент РФ 2102849) [92].

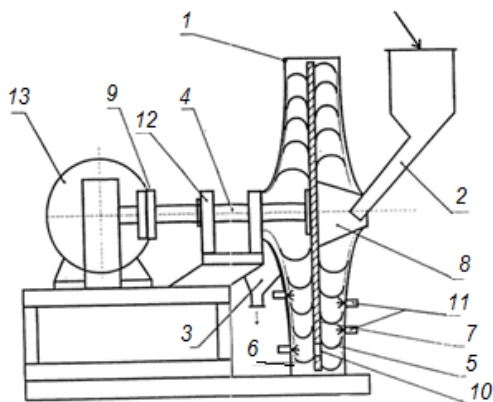


Рис. 1.15. Схема барабанного дражироватора: 1 – рабочий орган; 2 – загрузочный патрубкок; 3 – разгрузочный патрубкок; 4 – вал; 5, 6 – коаксиальные спиральные обечайки; 7 – диск; 8 – конический накопитель; 9 – соединительная муфта; 10 – окно пересыпания гранул; 11 – форсунка; 12 – опора вала; 13 – электропривод

Дражиратор работает следующим образом. Компоненты поступают в бункер и по загрузочному патрубку 2 подаются в конический накопитель 8, из которого через отверстие высыпается в рабочий орган, выполненный в виде спирали. Ширина навивки спиралей сужается в направлении от оси вала к периферии. Этим достигается постоянство объема витка и равномерность высоты загрузки витка гранулами.

Диск 7 с прикрепленными спиральными обечайками 5 и 6 вращается, и гранулы, получая сложное движение, покрываются жидкостью, дополнительно подаваемой установленными ниже оси вала на неподвижных стенках спиральных обечаек 5 и 6 импульсными системами, выполненными в виде форсунок 11. Через окно 10 гранулы перемещаются в следующую обечайку. В центре обечайки 6 происходит выгрузка гранул. По патрубку 3 покрытые жидкостью гранулы попадают в сушилку.

Недостатками данного дражиратора являются сложность конструкции и невысокая производительность.

Рассмотрим схему центробежного дражиратора, представленную на рис. 1.16 (патент SU 1123562) [7].

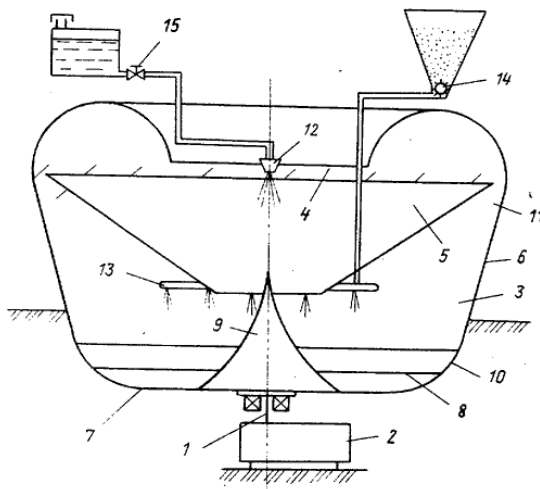


Рис. 1.16. Схема центробежного дражиратора: 1 – вертикальный вал; 2 – механизм привода; 3 – рабочая емкость; 4 – окно для подачи семян и химических веществ; 5 – направляющая воронка; 6 – корпус емкости; 7 – подвижное днище; 8 – лопасти; 9 – конус днища; 10 – тороидальный край днища; 11 – направляющие лопатки; 12 – распылитель жидкости; 13 – распылитель смеси; 14 – дозатор смеси; 15 – кран

Аппарат работает следующим образом. Дражируемые семена благодаря взаимодействию с поверхностью вращающегося днища 7 с лопастями 8 приобретают некоторый момент количества движения и, срываясь с поверхности днища, движутся по восходящей линии по поверхности корпуса 6, постепенно затормаживаясь, так как последний установлен неподвижно, а за счет того что верхняя часть корпуса образована полутороидом, семенные драже направляются к центру емкости 3 посредством лопаток 11 и падают в направляющую воронку 5, которая направляет драже на днище 7 на повторный цикл. В рабочую емкость 3 подается через распылитель 12 дозированная крапом 15 жидкость, а через распылители 13 отмеренная дозатором 14 смесь.

При движении семена поглощают своей поверхностью влагу и смесь и, обкатываясь по поверхности корпуса 6, днища 7 и воронки 5, уплотняют слой за слоем образующуюся оболочку. Днище 7 вращается от механизма привода 2, который позволяет плавно изменять угловую скорость. По мере достижения необходимых размеров драже процесс приостанавливают и производят выгрузку покрытых оболочкой семян.

Благодаря тому, что корпус емкости неподвижен, а днище расположено симметрично относительно вертикальной оси, вся конструкция уравновешена и семена, разлетаясь веером, не создают направленных моментов.

Лопастями 8 способствуют разгону семян, а конус днища 9 исключает попадание семян в зону малых окружных скоростей.

Достоинством данного дражирователя является получение качественной оболочки на поверхности семян. К недостаткам можно отнести:

- сложность конструкции;
- высокую металлоемкость оборудования.

Шнековый дражирователь (рис. 1.17) [29] работает следующим образом: сухие компоненты из дозатора 2 поступают в корпус 1 шнека, где происходит их перемешивание и перемещение к жиклерам 8. При этом по патрубку 3 в полую часть вала 6 подаются жидкие компоненты и через жиклер 8 вводятся в массу перемешанных сухих компонентов. Далее смесь подается к жиклеру 9, к которому по патрубку подводится горячий воздух. В результате взаимодействия горячего воздуха и сме-

си происходит сушка, и полуфабрикаты по лотку 5 выводятся из устройства.

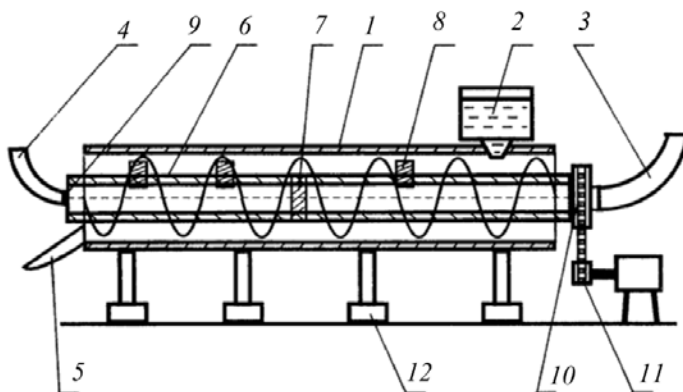


Рис. 1.17. Схема шнекового дражировщика: 1 – корпус; 2 – дозатор сухих компонентов; 3 – патрубок жидких компонентов; 4 – патрубок горячего воздуха; 5 – лоток полуфабрикатов; 6 – вал пружинного шнека; 7 – разделительная шайба; 8 – жиклер жидких компонентов; 9 – жиклер горячего воздуха; 10 – шкив привода шнека; 11 – электропривод; 12 – опорная стойка

Технология шнекового дражировщика достаточно проста, однако у нее имеются свои недостатки:

- невысокая равномерность обработки;
- повышенное трение семян в результате обработки;
- непрочная оболочка семени.

Необходимо отметить, что такая технологическая схема больше подходит для протравливания семян.

Вибрационный дражировщик, схема которого представлена на рис. 1.18 [15], работает следующим образом. От электрического двигателя вращение передается валу вибратора 4 с дебалансами 5, 6 и 7 генерирующего колебания. Эти колебания передаются семенам и порошкообразным компонентам через стенки и днища винтовой и кольцевой камер 1 и 2.

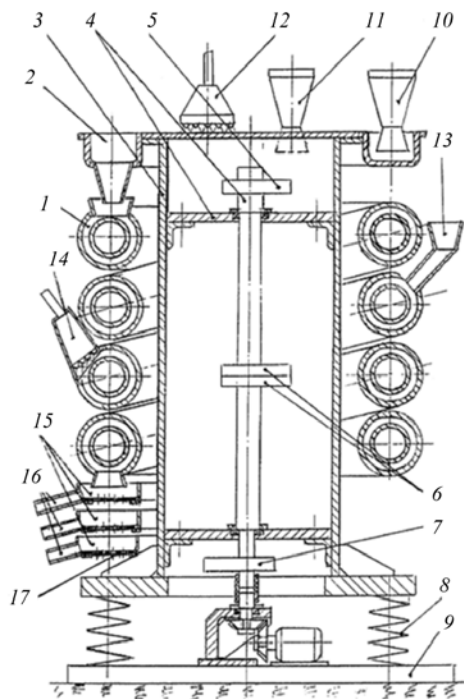


Рис. 1.18. Схема вибрационного дражжирователя: 1 – винтовая камера; 2 – кольцевая камера; 3 – корпус; 4 – вибратор; 5, 6, 7 – дебалансы; 8 – пружина; 9 – плита; 10, 11 – дозаторы; 12 – распылитель; 13 – дозатор; 14 – распылитель клеящего раствора; 15 – лотки; 16 – люки; 17 – калибровочные решета

Предлагаемая конструкция дражжирователя исключает встречные потоки семян, позволяет смеси компонентов, получая колебания, проходить поочередно сверху вниз по днищу кольцевой камеры 2 и трубным концентрическим каналам винтовой камеры 1. Из винтовой камеры обработанные семена проходят через калибровочные решета 17, лотки 15 и через люки 16 выходят из дражжирователя.

Вибрационный дражжирователь позволяет формировать достаточно качественную оболочку семени, однако имеет сложную конструкцию, что затрудняет контроль формирования оболочки семени на разных этапах.

Лидирующее место в производстве машин для дражирования семян занимают немецкая фирма Petkus и датская фирма Cimbria. Эти фирмы выпускают универсальные машины для создания искусственных оболочек, например, машины Petkus СТ-50 [85] и Cimbria Centricoater [113] (рис. 1.19).



*a*



*б*

Рис. 1.19. Схемы машин порционного действия:  
*a* – Petkus СТ-50; *б* – Cimbria Centricoater

Данный вид машин можно охарактеризовать: по принципу действия – периодического действия; по типу рабочих органов – с вращающимся дном; по расположению оси вращения рабочих органов – вертикальный; по частоте вращения рабочих органов – быстроходный.

Семена в виде завесы подаются в камеру смешивания, куда с помощью вращающегося с высокой скоростью диска в виде мелкодисперсного тумана распыляется дозируемый насосом химикат. В процессе смешивания семена движутся к стенкам как внешняя завеса, совпадающая по форме с коническим статором, достигают отверстия с меньшим диаметром и падают обратно к ротору в виде внутренней завесы.

Эффективное смешивание достигается без повреждения семян. В конце обработки очередной порции семена выгружаются с помощью электропневматической заслонки на выходе.

Машина непрерывного действия типа Petkus CT2-10 (рис. 1.20) [86] в основном используется для создания тонких оболочек. Ее можно охарактеризовать: по принципу действия – непрерывного действия; по типу рабочих органов – шнековая; по расположению оси вращения рабочих органов – горизонтальная; по частоте вращения рабочих органов – быстроходная.

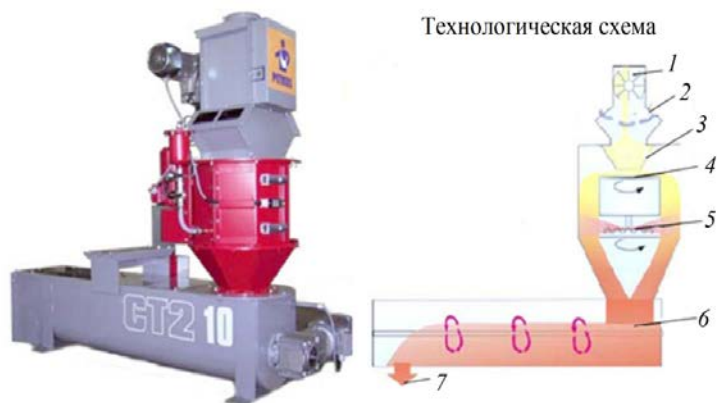


Рис. 1.20. Схема машины непрерывного действия Petkus CT2-10: 1 – вход в шлюзовую дозатор; 2 – загрузочная воронка; 3 – диск распределения продукта; 4 – диск-разбрызгиватель химиката; 5 – подача химиката; 6 – дополнительный смеситель со смесительными лопастями; 7 – выход обработанных семян

Она совмещает две технологии нанесения. Семена через шлюзовую дозатор *1* подаются в рабочую камеру. С помощью диска *3* они распределяются в виде «семенной завесы». Химикат, дозируемый насосом, распыляется на семена посредством вращающегося диска-разбрызгивателя *4*. Далее семена поступают в дополнительный смеситель *6*, где происходит распределение и фиксация химиката на поверхности семян.

Рассмотренные машины непрерывного и периодического действия имеют свои достоинства и недостатки. Необходимо отметить, что для дражирования в большей степени подходят машины периодического (порционного) действия, поскольку в них можно задавать время обработки и получать семена с различными оболочками, как по толщине, так и по составу [47, 48, 108, 109, 110].

### **1.5. Обоснование конструктивно-технологической схемы центробежного дражиратора**

Конструкция центробежного дражиратора периодического действия с использованием вращающегося дна является в настоящее время наиболее совершенной, поскольку позволяет создавать различные по толщине оболочки семян с большой производительностью и высоким качеством обработки, а также осуществлять автоматизированную выгрузку семян.

На постсоветском пространстве применение дражираторов не находит широкого распространения, что отчасти обусловлено недостатком научных исследований в этой области. Разработанные и успешно функционирующие за рубежом дражираторы имеют высокую стоимость, и их использование в Республике Беларусь не всегда экономически целесообразно. Поэтому стоит задача в разработке конструкции и обосновании параметров и режимов работы отечественного дражиратора центробежного типа.

При использовании дражираторов центробежного типа наблюдается недостаточное перемешивание слоев семян, расположенных на различных расстояниях от стенок камеры смешивания, приводящее к формированию оболочек различной толщины. При разработке предлагаемой конструкции центробежного дражиратора будет эффективной установка в камере смешивания устройства, обеспечивающего активное перемешивание семян с химическими компонентами и способствующего формированию одинаковой по толщине оболочки на их

поверхности. Таким устройством в предлагаемой для дальнейших исследований конструкции дражироватора (рис. 1.21) является лопастной отражатель.

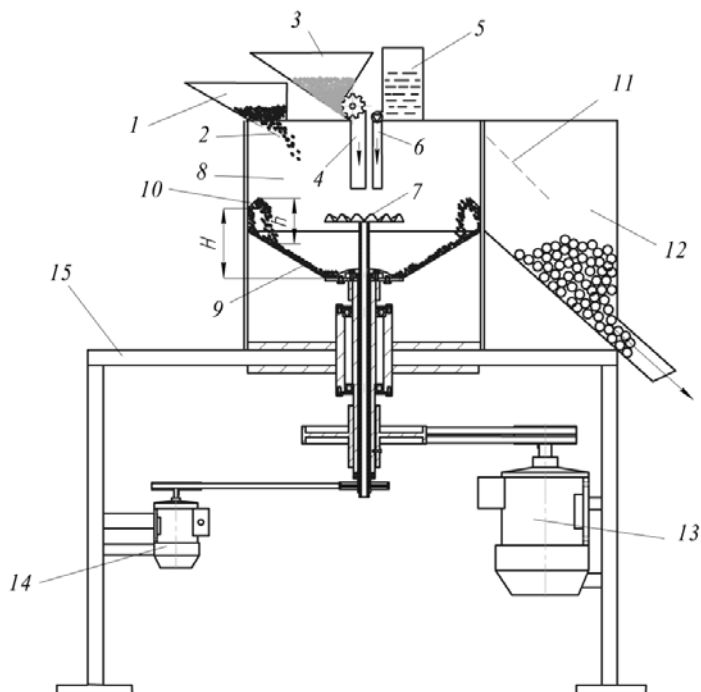


Рис. 1.21. Схема центробежного дражироватора семян с лопастным отражателем:  
 1 – загрузочный бункер для семян; 2 – впускная заслонка; 3 – бункер для порошкообразных препаратов защитного и стимулирующего действия;  
 4 – трубопровод порошкообразных препаратов; 5 – резервуар с жидкими компонентами; 6 – трубопровод подачи жидких компонентов;  
 7 – дисковый распылитель; 8 – камера смешивания; 9 – дно камеры смешивания;  
 10 – лопастной отражатель; 11 – выгрузная заслонка; 12 – выгрузной бункер;  
 13 – электродвигатель привода дна камеры смешивания;  
 14 – электродвигатель привода распылителя; 15 – рама

Устройство работает следующим образом: семена через впускную заслонку 2 подаются в камеру смешивания 8 на вращающееся с угловой скоростью дно 9 и под действием центробежной силы перераспределяются вдоль цилиндрической поверхности корпуса камеры

смешивания, совершая спиралевидное движение. При движении они попадают на лопастной отражатель 10, поверхностью которого отражаются вниз на подвижное дно 9. Падая, семена образуют по контуру камеры смешивания волнообразный поток – «семенную завесу» высотой  $h$ , которая в течение времени  $t_1$  обрабатывается жидким химическим компонентом связующего действия. Для этого на дисковый распылитель 7, вращающийся с угловой скоростью  $\omega_{рас}$ , из резервуара 5 по патрубку 6 поступает жидкий химический компонент. Посредством дискового распылителя 7 он разбивается на капли и пронизывает поток движущихся семян перпендикулярно его движению, обеспечивая равномерное нанесение жидкого компонента на семена. В результате проведения цикла обработки в течение времени  $t_1$  на поверхности каждого семени образуется тонкий слой жидкого компонента.

Затем в течение времени  $t_2$  начинается ввод и смешивание с семенами порошкообразных препаратов защитного и стимулирующего действия. При этом дно камеры смешивания вращается с угловой скоростью  $\omega$ , подобранной так, чтобы минимизировать зоны отрыва семян от корпуса камеры смешивания, но достаточной для прохождения семенами лопастного отражателя. В это время из бункера 3 строго дозированная порция порошка защитного и стимулирующего действия попадает на дисковый распылитель 7, с которого равномерно перераспределяется в поток движущихся семян. При активном совместном движении частичек порошкообразного компонента с семенами происходит налипание порошка на их поверхность. Постоянное соприкосновение в этом случае семян со стенками корпуса способствует уплотнению защитно-питательной оболочки на поверхности семян.

Циклы ввода жидкого компонента и порошкообразных препаратов повторяются до тех пор, пока семенное драже не приобретет нужный размер. После обработки семян автоматически открывается выгрузная заслонка 11 и порция готового продукта через образовавшееся отверстие за счет центробежной силы поступает в бункер 12.

Предлагаемая схема центробежного дражирователя позволяет реализовать принцип слияния направленных, перекрестно движущихся потоков сыпучего и жидкого компонентов с взаимным проникновением одного в другой с наименьшими затратами энергии и времени, обеспечивая при этом наилучшие условия для дражирования.

## 1.6. Обзор результатов исследований нанесения жидких компонентов с использованием дискового распылителя

Равномерность нанесения жидких компонентов в дражираторах имеет важное значение, так как наносимая на семена жидкость является также и связующим элементом, а значит, от площади и равномерности покрытия ею семени зависит интенсивность и качество процесса дражирования.

Распыливание (диспергирование) жидкости заключается в дроблении струи жидкости на большое количество капель и распределении их в пространстве. Устройства для распыливания жидкости называются распылителями, или форсунками. Рассмотрим существующие способы распыливания жидкостей.

*Гидравлическое распыливание.* Основным энергетическим фактором, приводящим к распаду жидкости на капли, является давление нагнетания. Проходя через распыливающее устройство, поток жидкости приобретает высокую скорость и преобразуется в форму, способствующую быстрому и эффективному распаду (струя, пленка, крупные частицы, в зависимости от принадлежности распылителя к тому или иному классу). Создаваемый гидравлическим способом распыл довольно грубый и неоднородный, затруднены регулирование расхода при заданном качестве дробления, а также распыливание высоковязких жидкостей. В то же время этот способ наиболее широко распространен вследствие сравнительной его простоты [74].

*Механическое распыливание.* При этом способе жидкость получает энергию вследствие трения о быстровращающийся рабочий элемент. Приобретая вместе с рабочим элементом вращательное движение, жидкость под действием центробежных сил срывается с распылителя и дробится на капли. К достоинствам этого способа следует отнести возможность распыливания высоковязких жидкостей и регулирования производительности распылителя без существенного изменения дисперсности создаваемого потока. Механическое распыливание используют главным образом для дробления вязких жидкостей и суспензий [74].

*Пневматическое распыливание.* При таком способе диспергирования энергия подводится к жидкости главным образом в результате динамического взаимодействия ее с высокоскоростным потоком газа (распыливающего агента). Благодаря большой относительной скорости потоков в распылителе или за его пределами жидкость сначала рассла-

ивается на отдельные нити, которые затем распадаются на капли. К достоинствам пневматического способа относятся небольшая зависимость качества распыливания от расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыливания высоковязких жидкостей. Недостатками являются повышенный расход энергии на распыливание и необходимость в распыливающем агенте, а также в оборудовании для его подачи [74].

*Акустическое распыливание* во многом сходно с пневматическим. Жидкость получает энергию при взаимодействии с потоком газа. Однако при этом, в отличие от пневматического распыливания, газу сообщаются колебания ультразвуковой частоты, что при прочих равных условиях обеспечивает более тонкое и однородное дробление. Этот способ распыливания более экономичен и перспективен, чем пневматическое диспергирование, однако конструкции акустических распылителей несколько сложнее, чем пневматических [74].

*Электростатическое распыливание.* Жидкости еще до ее истечения или в момент истечения сообщают электростатический заряд. Под действием кулоновских сил струя жидкости распадается на капли таких размеров, при которых силы взаимного отталкивания капель уравновешиваются силами поверхностного натяжения. Возможен и другой вариант, когда жидкость подают в область сильного электростатического поля, под действием которого на поверхности жидкости происходит некоторое распределение давления. Это вызывает деформацию струи жидкости и распад ее на капли. Недостатками электростатического распыливания являются необходимость в дорогостоящем оборудовании, его высокая энергоемкость, малая производительность и сложность обслуживания [74].

*Ультразвуковое распыливание.* Жидкость подается на колеблющийся с ультразвуковой частотой элемент пьезоэлектрического или магнитострикционного генератора и срывается с него в виде мелких капель. Недостатками пьезоэлектрических и магнитострикционных распылителей являются малая производительность и необходимость в сложном дорогостоящем оборудовании [74].

*Пульсационное распыливание.* Отличительной особенностью данного способа является наложение пульсаций давления или расхода на поток распыляемой жидкости. Возникающие при этом дополнительные колебания жидкостной пленки (или струи) способствуют увеличению поверхностной энергии, быстрой потере устойчивости потока и, как следствие, более тонкому диспергированию. Пульсационное рас-

пыливание может сочетаться с любым из рассмотренных выше способов. При этом к преимуществам того или иного способа добавляется еще одно: повышение качества и однородности дробления, происходящее в ряде случаев без увеличения энергозатрат и при незначительном усложнении конструкции распылителей [74].

*Распыливание с предварительным газонасыщением.* Жидкость перед подачей в распылитель или непосредственно в самом распылителе насыщают газом. Распределенный в жидкости в виде пузырьков газ сжимается до ее давления и частично растворяется. При этом возрастает и поверхностная энергия потока. Возрастание энергии, а также быстрое расширение пузырьков и десорбция газа при истечении жидкости из распылителя приводят к ее распаду на более мелкие, чем в условиях обычного гидравлического распыливания, капли [74].

*Электрогидравлическое распыливание.* Потoku жидкости сообщается дополнительная энергия за счет высоковольтного электрического разряда в полости распылителя. В образующемся плазменном шнуре наблюдается скачок температуры до нескольких тысяч градусов и скачок давления до нескольких тысяч атмосфер. Происходит выброс высокоскоростного потока капель, которые догоняют и дополнительно дробят частицы, покинувшие распылитель в период между импульсами [74].

*Комбинированные методы распыливания.* Сочетание нескольких перечисленных выше способов распыливания позволяет получить такие характеристики распыла, которые невозможно обеспечить применением каждого из них в отдельности. Например, сочетание пневматического и гидравлического методов (пневно-гидравлическое распыливание) позволяет получить распыл с дисперсными характеристиками, не уступающими полученным при пневматическом распыливании, но при значительно меньших затратах энергии. Любой из упомянутых способов распыливания может оказаться наиболее экономичным для конкретных условий производства и требований к качеству и дисперсности готового продукта [74].

Рассмотрев существующие способы распыливания жидкостей, можно сделать вывод о том, что наиболее простым и универсальным способом для использования в камере смешивания дражжирователя является механическое распыливание.

Для механического распыливания используются распылители, представленные на рис. 1.22 [74].

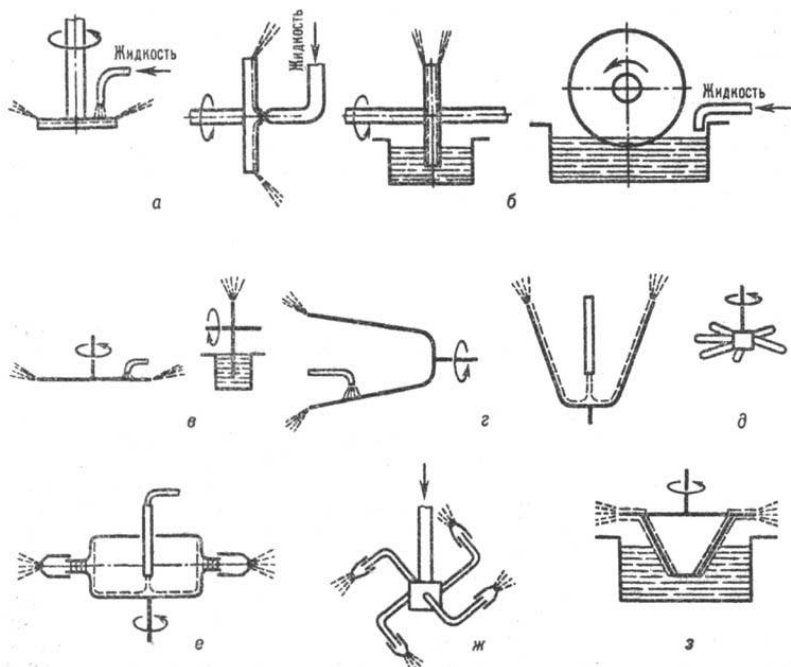


Рис. 1.22. Механические распылители

Различают механические распылители двух групп: с непосредственной подачей жидкости на рабочий элемент (рис. 1.22, а, в, г, д, е, ж) и погружные (рис. 1.22, б, з). К первой группе относятся распылители, имеющие дисковые, чашечные, звездочные, сопловые и реактивные элементы, ко второй – дисковые и конусные элементы.

Для ввода связующей жидкости в предлагаемой технологической схеме (см. рис. 1.20) наиболее простым и эффективным является использование дискового распылителя с непосредственной подачей жидкости, так как он позволяет вводить в поток семян с достаточно высокой равномерностью даже вязкие жидкости и при этом получать мелкодисперсный факел распыла по круговому контуру.

Установлено [11, 35, 62, 74, 97], что чем меньше размер капель, тем больше будет суммарная площадь покрытия семян и эффективнее происходит обработка.

Процесс распыла жидкости с помощью центробежного диска раз-

деляют на три стадии [74]: течение по рабочему элементу, образование капель за кромкой рабочего элемента и движение капель в воздушном потоке. Его можно представить следующим образом: объем жидкости, попадая на поверхность диска, перераспределяется к периферии под действием центробежных сил. В результате на его поверхности образуется пленка, толщина которой уменьшается при движении жидкости от центра диска к кромке. Двигаясь к краю распылителя, жидкость за счет давления, вызванного трением о воздух, распадается на тонкие струйки. В момент равенства центробежной силы и силы поверхностного натяжения на периферии диска образуется краевое утолщение – жидкий тор, который распадается на капли. У кромки диска формируются наиболее однородные по размерам основные капли, называемые первичными, и более мелкие капельки-спутники, которые образуют факел распыла.

Анализ литературных источников [11, 35, 74] показывает, что по диску струйки распыляемой жидкости двигаются по криволинейной траектории. Динамику изменения поля скоростей такого движения описывает система уравнений

$$\begin{aligned}
 V_x^0 &= \sqrt[3]{\frac{3r_{\text{рас}} \omega_{\text{рас}}^4 Q_{\text{ж}}}{2\pi v_{\text{ж}}^2} \delta_{\text{п}} \frac{r_{\text{рас}} \omega_{\text{рас}}^2}{2 v_{\text{ж}}} \delta_{\text{п}}^2}, \\
 V_y^0 &= r_{\text{рас}} \omega_{\text{рас}} \left( 1 - \frac{Q_{\text{ж}}}{\pi v_{\text{ж}} r_{\text{рас}}^2} \delta_{\text{п}} \sqrt[3]{\frac{\omega_{\text{рас}}^2 Q_{\text{ж}}}{18\pi v_{\text{ж}} r_{\text{рас}}^2} \delta_{\text{п}}^2} + \frac{\omega_{\text{рас}}^2}{12 v_{\text{ж}}^2} \delta_{\text{п}}^4 \right); \\
 V_z^0 &= \sqrt[3]{\frac{3\omega_{\text{рас}}^4 Q_{\text{ж}}}{16\pi v_{\text{ж}}^2 r_{\text{рас}}^2} \delta_{\text{п}}^2 \frac{\omega_{\text{рас}}^2}{6 v_{\text{ж}}} \delta_{\text{п}}^3},
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $V_x^0$ ,  $V_y^0$ ,  $V_z^0$  – радиальная, окружная и осевая составляющие скорости движения жидкости, м/с;

$\delta_{\text{п}}$  – толщина пленки жидкости, м;

$\omega_{\text{рас}}$  – угловая скорость распылителя, рад/с;

$r_{\text{рас}}$  – радиус распылителя, м;

$Q_{\text{ж}}$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$v_{\text{ж}}$  – вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

При этом среднюю толщину пленки жидкости на кромке диска и необходимый минимальный радиус диска можно определить на основании следующих формул:

$$\delta_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{3v_{\text{ж}} Q_{\text{ж}}}{2\pi \rho_{\text{ж}} \omega_{\text{рас}}^2 r_{\text{рас}}^2}}; \quad (1.2)$$

$$r_{\text{рас}} = 56 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{v_{\text{ж}} Q_{\text{ж}}}{\omega_{\text{рас}}^2}}, \quad (1.3)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

На основании источника [11] диаметр струйки можно связать с толщиной пленки жидкости  $\delta$  на поверхности распылителя как

$$d_{\text{с}} = k_{\text{ж}} \cdot \delta_{\text{п}}, \quad (1.4)$$

где  $k_{\text{ж}}$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины пленки на поверхности диска в струйке соответствующего диаметра  $d_{\text{с}}$ .

Анализ факторов, влияющих на процесс распыла [11, 35, 74], показывает, что средний диаметр капель распыла, создаваемого центробежными дисковыми распылителями, зависит от следующих факторов:

- 1) угловой скорости  $\omega_{\text{рас}}$  и радиуса  $r_{\text{рас}}$  распылителя;
- 2) поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{ж}}$ , плотности  $\rho_{\text{ж}}$  и вязкости  $v_{\text{ж}}$  жидкости;
- 3) расхода жидкости (объемной производительности распылителя)  $Q_{\text{ж}}$ ;
- 4) формы распылителя.

Процесс диспергирования происходит только тогда, когда внешние силы, действующие на струйку, превосходят силы поверхностного натяжения. Таким образом, в качестве внешней силы, преимущественно определяющей размер частиц, рассматривается центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = m_{\text{стр}} \cdot \omega_{\text{рас}}^2 \cdot r_{\text{рас}}, \quad (1.5)$$

где  $m_{\text{стр}}$  – масса струйки от ее края до точки отрыва, кг.

В момент каплеобразования центробежная сила сравнивается с силой поверхностного натяжения

$$F_{\text{пн}} = l_{\text{с}} \cdot \sigma_{\text{ж}}, \quad (1.6)$$

где  $l_{\text{с}}$  – длина струйки, из которой формируется капля, м;

$\sigma_{\text{ж}}$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

При установившемся процессе каплеобразования массу струйки можно считать равной массе образуемой из нее капли, соответственно масса струйки и капли равны:

$$m_{\text{стр}} = \rho_{\text{ж}} \cdot S_{\text{с}} \cdot l_{\text{с}}; \quad (1.7)$$

$$m_{\text{к}} = 1/6 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot d_{\text{к}}^3, \quad (1.8)$$

где  $S_{\text{с}}$  – площадь профиля струйки,  $\text{м}^2$ ;

$d_{\text{к}}$  – диаметр капли жидкого компонента, м.

С учетом данного факта в источнике [11] была получена формула для определения диаметра первичных капель, определяющих дисперсность факела распыла:

$$d_k = 6 \frac{\frac{Q_{\text{ж}}}{\text{ж}}}{\frac{\text{рас}}{\text{ж}} \frac{\text{ж}}{r_{\text{рас}}^5}}^{\frac{3}{8}} \cdot \quad (1.9)$$

Анализ, приведенный в работах [11, 35], показывает, что коэффициенты корреляции, полученные экспериментальным путем, совпадают с расчетными данными, следовательно, можно использовать зависимость (1.3) при выборе параметров распылителя.

Для характеристики эффективности обработки семян жидкостью в источнике [97] был введен параметр эффективного покрытия

$$M_{\text{эф}} = M_c \cdot K_{\text{эф}}, \quad (1.10)$$

где  $M_c$  – степень покрытия каплями обрабатываемой поверхности;

$K_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективного действия капли.

$$M_c = \frac{25}{f_0} d_{ki}^2 n_{ki}, \quad (1.11)$$

где  $d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{ki}$  – диаметры капель, м;

$n_{k1}, n_{k2}, \dots, n_{ki}$  – количество капель каждого размера, шт.;

$f_0$  – исследуемая площадь, м<sup>2</sup>.

$$K_{\text{эф}} = \frac{0,78(d_{\text{сл}} \cdot 2R)^2}{d_{\text{сл}}^2}, \quad (1.12)$$

где  $R$  – зона эффективного действия капли, м;

$d_{\text{сл}}$  – диаметр следа капли, м.

Анализ зависимости (1.10) показывает, что степень эффективности работы распылителя при обработке семян тем выше, чем меньше размеры капель и выше коэффициент эффективного действия капли.

## Выводы

1. Предпосевная обработка семян сахарной свеклы способом дражирования является перспективной. Она позволяет улучшить всхожесть, защитить семена от болезней и вредителей, повысить их жизнеспособность и облегчить высев, тем самым способствует сведению к минимуму таких энергозатратных операций, как прореживание и обработка посевов ядохимикатами.

2. В настоящее время способ предпосевной обработки семян путем дражирования в Республике Беларусь не нашел широкого распространения. Его внедрение в промышленных масштабах сдерживается дороговизной зарубежного оборудования и недостаточной исследованностью процесса дражирования. Для внедрения технологии дражирования в производство необходимо более глубокое изучение процесса обволакивания и наслаивания питательных компонентов на поверхность семян на основе существующих смесей для дражирования, а также разработка эффективной технологической схемы и оборудования для реализации данного процесса.

3. Анализ существующих конструкций дражирователей показывает, что наиболее совершенным в настоящее время оборудованием для дражирования семян сахарной свеклы является центробежный дражирователь периодического действия, формирующий семенное драже в камере смешивания с вращающимся дном и дисковым распылителем химических компонентов.

4. При использовании центробежных дражирователей наблюдается недостаточное перемешивание слоев семян, расположенных на различных расстояниях от стенок камеры смешивания, приводящее к формированию оболочек различной толщины. Для повышения эффективности дражирования семян сахарной свеклы целесообразно применить в камере смешивания лопастной отражатель, способствующий интенсивному перемешиванию семян с химическими компонентами и формированию качественного семенного драже.

5. Использование внутри камеры смешивания дискового распылителя обеспечивает равномерное и быстрое смешивание жидких компонентов с семенами. Для создания эффективного распыления жидких компонентов необходимо выбрать оптимальный радиус дискового распылителя и угловую скорость вращения его при заданном расходе жидкости и ее свойствах.

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРАЖИРОВАНИЯ СЕМЯН В КАМЕРЕ СМЕШИВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДРАЖИРАТОРА

## 2.1. Этапы движения семени в камере смешивания

Дражирование семян происходит в результате процессов ввода компонентов, смешивания их и наслаивания. Все они тем или иным образом связаны с организацией движения компонентов, участвующих в изучаемом процессе: семян сахарной свеклы, связующей жидкости (воды), сухого наполнителя – химических элементов (бленды), образующих оболочку семенного драже. Интенсифицировать процесс дражирование возможно за счет активного и равномерного перераспределения и улучшения взаимодействия названных компонентов. Взяв за основу предлагаемую схему центробежного дражиратора (см. рис. 1.12), произведем теоретические исследования рабочего процесса.

Семена, попадая в камеру смешивания центробежного дражиратора, совершают следующие виды движения:

- восходящее спиралевидное движение вверх по вращающемуся дну дражиратора;
- подъем по инерции по неподвижному цилиндрическому корпусу камеры смешивания;
- движение по лопастям отражателя;
- волновое движение вниз на подвижное дно.

Поток семян, отражаясь вниз от лопастей отражателя, образует «семенную завесу» в вертикальной плоскости. В этот момент семенной поток пронизывается перпендикулярным потоком химических компонентов, движение которых задается центробежным дисковым распылителем. Именно такая организация процесса смешивания компонентов считается наиболее эффективной.

Затем производится цикл формирования оболочек. Происходит накатывание на смоченную поверхность семян более мелких частиц химических элементов в результате взаимодействия их с рабочими элементами камеры смешивания и между собой. Продолжительность такого цикла определяется качественными показателями оболочек. Размер оболочек характеризуется повторностью циклов ввода жидких и сухих компонентов.

На основании представленного анализа выдвинем гипотезу о том, что режимы дражирования семян зависят от конструктивных и кинематических параметров камеры смешивания предлагаемого оборудования, поэтому теоретическое изучение этих параметров является важной задачей при их обосновании и создании опытного образца.

## 2.2. Определение геометрических параметров вращающегося дна центробежного дражироватора

Подвижная часть (дно) является одним из основных элементов камеры смешивания центробежного дражироватора. Ее коническая форма в предлагаемой установке была выбрана, исходя из возможности поднять массу семян на необходимую высоту при вращательном движении, а также из-за простоты ее изготовления.

Представим подвижную часть камеры смешивания дражироватора в виде усеченного конуса, обращенного большим основанием с радиусом  $R_{\text{дн}}$  вверх, с высотой  $H_{\text{дн}}$ , постоянной конусностью (половина угла при вершине) и радиусом меньшего основания  $r_{\text{дн}}$ . Сделаем привязку этого элемента к декартовой системе координат (рис. 2.1).

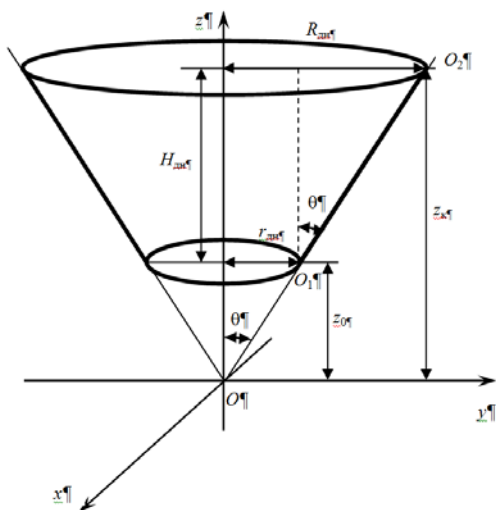


Рис. 2.1. Схема конического дна камеры смешивания дражироватора

Для этого предполагаемую вершину конуса поместим в начало системы координат – точку  $O(0; 0; 0)$ , а сам конус ориентируем так, чтобы его ось симметрии совпала с осью  $Oz$  выбранной системы.

Введем обозначения. Угол при вершине конуса примем равным  $2\alpha$ . Выделим рабочую зону конического дна, для этого рассмотрим лишь ту его часть, которая лежит на расстоянии от  $z_0$  до  $z_k$  по оси  $Oz$ . Тогда высота вращающейся части камеры смешивания  $H_{\text{дн}} = z_k - z_0$ . Радиус меньшего основания дна обозначим  $r_{\text{дн}}$ , а большего –  $R_{\text{дн}}$ . Введенные параметры связаны между собой соотношением

$$H_{\text{дн}} = \frac{R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}}}{\text{tg} \alpha}. \quad (2.1)$$

Величину образующей  $O_1O_2$  конуса можно определить различными способами:

$$l_{\text{дн}} = \sqrt{H_{\text{дн}}^2 + (R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}})^2}; \quad (2.2)$$

$$l_{\text{дн}} = \frac{R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}}}{\sin \alpha}; \quad (2.3)$$

$$l_{\text{дн}} = \frac{H_{\text{дн}}}{\cos \alpha}. \quad (2.4)$$

Используя соотношения (2.1)–(2.4), после преобразований получим:

$$R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}} = l_{\text{дн}} \sin \alpha; \quad (2.5)$$

$$R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}} = H_{\text{дн}} \text{tg} \alpha. \quad (2.6)$$

Зафиксировав местоположение устройства, мы можем записать уравнение его образующей. Так как образующая конуса в плоскости  $yOz$  проходит через точки  $O(0; 0)$  и  $O_1(r_{\text{дн}}; \frac{r_{\text{дн}}}{\text{tg} \alpha})$ , то уравнение прямой,

являющейся образующей конического дна, будет иметь следующий вид:

$$\frac{y - 0}{r_{\text{дн}} - 0} = \frac{z - 0}{\frac{r_{\text{дн}}}{\text{tg} \alpha} - 0}$$

После преобразований получим:

$$y = z \cdot \text{tg} \alpha. \quad (2.7)$$

Тогда уравнение конического дна в декартовой системе координат  $Oxyz$  примет вид

$$x^2 + y^2 + z^2 \text{tg}^2 \alpha = 0. \quad (2.8)$$

Объем вращающегося дна камеры смешивания является предельной величиной по загрузке предлагаемого оборудования, так как только при определенном его заполнении можно добиться устойчивого движения вверх всех семян.

Объем вращающегося дна камеры смешивания в форме обратного усеченного конуса с учетом введенных обозначений может быть вычислен по формуле

$$V_{\text{дн}} = \text{tg} \int_{z_0}^{z_x} z^2 dz; \quad (2.9)$$

$$V_{\text{дн}} = \frac{1}{3} H_{\text{дн}} (R_{\text{дн}}^2 + R_{\text{дн}} r_{\text{дн}} + r_{\text{дн}}^2) = \frac{1}{3} \frac{R_{\text{дн}} - r_{\text{дн}}}{\text{tg}} (R_{\text{дн}}^2 + R_{\text{дн}} r_{\text{дн}} + r_{\text{дн}}^2). \quad (2.10)$$

Выражения (2.1) и (2.6) устанавливают связь между конструктивными параметрами конического дна. Они показывают, что геометрические параметры конического дна камеры смешивания дражжиратора и его местоположение относительно декартовой системы координат определяются тремя параметрами: 1) радиусом меньшего основания  $r_{\text{дн}}$  (м); 2) углом (рад), определяющим конусность; 3) радиусом большего основания  $R_{\text{дн}}$  (м) или его высотой  $H_{\text{дн}}$  (м).

Выражения (2.9) и (2.10) определяют зависимость объема конического дна от конструктивных параметров устройства  $r_{\text{дн}}$ ,  $R_{\text{дн}}$ ,  $H_{\text{дн}}$ . Данные параметры напрямую влияют на производительность дражжиратора, поэтому это влияние должно быть изучено и учтено в экспериментальных и теоретических исследованиях.

### 2.3. Исследование движения семени по вращающемуся коническому дну камеры смешивания

Смоделируем процесс движения семени по поверхности конического дна, вращающегося вокруг своей вертикальной оси. Уравнение поверхности дна будет определяться зависимостью (2.8) в декартовой системе координат. Будем рассматривать случай, когда оно вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ .

Примем единичное семя за материальную точку, обладающую массой  $m_c$  и повторяющую движение всего потока семян. Тогда на ее движение по поверхности подвижного дна камеры смешивания будут оказывать влияние следующие силы: сила тяжести  $\vec{P}$ , нормальная реакция поверхности  $\vec{N}$ , сила сопротивления движению  $\vec{F}_c$ .



риальной точки при ее движении. Ось  $O$  будет показывать изменение угла наклона вектора скорости по отношению к оси вращения дна, поэтому соответствующая координата будет определять конусность текущего положения материальной точки и соответствовать конусности ограничивающей поверхности. Ось  $O$  будет характеризовать изменение угла поворота материальной точки в горизонтальной плоскости  $xOy$ , а значит, определять ее текущую долготу.

Связь между декартовыми прямоугольными и сферическими координатами материальной точки будем осуществлять на основании следующих соотношений:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \alpha \cos \varphi; \\ y &= r \sin \alpha \sin \varphi; \\ z &= r \cos \alpha, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $r$  – радиус-вектор текущего положения материальной точки, м;  
 $\alpha$  – конусность текущего положения материальной точки, рад;  
 $\varphi$  – абсолютная долгота текущего положения материальной точки, рад.

Для получения системы уравнений движения материальной точки внутри конического вращающегося дна воспользуемся выражением проекций ускорений материальной точки через криволинейные координаты  $q_i$  [9]:

$$a_{q_i} = \frac{1}{H_{q_i}} \frac{d}{dt} \frac{L}{\dot{q}_i} - \frac{L}{q_i}, \quad (2.13)$$

где  $a_{q_i}$  – проекции ускорения материальной точки;  
 $q_i$  – обобщенные координаты системы;

$$H_{q_i} = \sqrt{\frac{x^2}{q_i^2} + \frac{y^2}{q_i^2} + \frac{z^2}{q_i^2}} - \text{коэффициенты Ламе}; \quad (2.14)$$

$\frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования;

$\frac{\partial}{\partial q_i}$  – оператор частного дифференцирования;

$$L = \frac{1}{2} \vec{V}^2 - \frac{1}{2} \sum_i H_{q_i}^2 \dot{q}_i^2 - \text{функция Лагранжа}. \quad (2.15)$$

Проекции ускорения материальной точки могут быть найдены с помощью зависимостей [1]:

$$\ddot{x} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}}, \ddot{y} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}}, \ddot{z} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}} \frac{L}{\dot{\cdot}}_{abc}, \quad (2.16)$$

где  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  – проекции ускорения материальной точки, выраженные через сферические координаты.

Для вычисления функции Лагранжа используем зависимость

$$L = \frac{1}{2} \vec{V}^2 - \frac{1}{2} (H^2 \dot{\cdot}^2 + H^2 \dot{\cdot}^2 + H^2 \dot{\cdot}^2_{abc}). \quad (2.17)$$

Определим коэффициенты Ламе по формуле (2.14) с учетом связи (2.12) между декартовыми и сферическими координатами материальной точки. Получим:

$$H = \sqrt{\frac{x^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{y^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{z^2}{\dot{\cdot}^2}} \sqrt{\sin^2 \cos^2_{abc} \sin^2 \sin^2_{abc} \cos^2} \sqrt{\sin^2 (\cos^2_{abc} \sin^2_{abc}) \cos^2} \quad 1; \quad (2.18)$$

$$H = \sqrt{\frac{x^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{y^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{z^2}{\dot{\cdot}^2}} \sqrt{\dot{\cdot}^2 \cos^2 \cos^2_{abc} \dot{\cdot}^2 \sin^2 \sin^2_{abc} \dot{\cdot}^2 \sin^2} \sqrt{\dot{\cdot}^2 \cos^2 (\cos^2_{abc} \sin^2_{abc}) \dot{\cdot}^2 \sin^2} \sqrt{\dot{\cdot}^2 (\cos^2 \sin^2)} \quad ; \quad (2.19)$$

$$H = \sqrt{\frac{x^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{y^2}{\dot{\cdot}^2} + \frac{z^2}{\dot{\cdot}^2}} \sqrt{\dot{\cdot}^2 \sin^2 \sin^2_{abc} \dot{\cdot}^2 \sin^2 \cos^2_{abc} \dot{\cdot}^2 \sin^2} = \sqrt{\dot{\cdot}^2 \sin^2 (\sin^2_{abc} \cos^2_{abc})} \sin \dot{\cdot}. \quad (2.20)$$

Тогда функция Лагранжа (2.15) примет следующий вид:

$$L = \frac{1}{2} \vec{V}^2 - \frac{1}{2} (\dot{\cdot}^2 + (\dot{\cdot})^2 + (\sin \dot{\cdot}_{abc})^2). \quad (2.21)$$

Из (2.21) следует, что величина вектора скорости материальной точки сферических координат будет определяться по формуле

$$|\vec{V}| = \sqrt{\dot{\cdot}^2 + (\dot{\cdot})^2 + (\sin \dot{\cdot}_{abc})^2}. \quad (2.22)$$

На основании зависимостей (2.16), вычисленных коэффициентов (2.18)–(2.20) и функции Лагранжа (2.21) проекции вектора ускорения материальной точки на оси сферической системы координат будут выглядеть следующим образом [124]:

$$\ddot{x} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\sin \alpha} - \frac{L}{2} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \frac{d}{dt} \alpha^2 - \left( \dot{\alpha} \right)^2 \left( \sin \alpha \frac{1}{\sin \alpha} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha - \left( \sin \alpha \frac{1}{\sin \alpha} \right)^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha - \left( \frac{1}{\sin \alpha} \dot{\alpha} \right)^2; \quad (2.23)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\sin \alpha} - \frac{L}{2} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \frac{d}{dt} \alpha^2 - \left( \dot{\alpha} \right)^2 \left( \sin \alpha \frac{1}{\sin \alpha} \right)^2 - \frac{L}{2} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \frac{d}{dt} 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha - \left( \sin \alpha \frac{1}{\sin \alpha} \right)^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \alpha^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \alpha^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \alpha^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \alpha^2 \sin^2 \alpha; \quad (2.24)$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{\sin \alpha} - \frac{L}{2} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \frac{d}{dt} \alpha^2 - \left( \dot{\alpha} \right)^2 \left( \sin \alpha \frac{1}{\sin \alpha} \right)^2 - \frac{1}{\sin \alpha} \frac{d}{dt} \left( \sin \alpha \right)^2 \frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{\sin \alpha} - 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{\sin \alpha} - 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{\sin \alpha} - 2 \alpha^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{\sin \alpha}; \quad (2.25)$$

Выразим проекции сил, действующих на материальную точку, через сферические координаты.

Известно [16], что любая векторная величина может быть представлена как произведение ее модуля (длины) на единичный вектор, задающий направление, т. е.

$$\vec{c} = |\vec{c}| \vec{e}_c.$$

С учетом этого нормальную реакцию  $\vec{N}$ , действующую на материальную точку, можно представить следующим образом:

$$\vec{N} = |\vec{N}| \vec{e}_N. \quad (2.26)$$

Из курса теоретической механики [9] известно, что нормальная реакция, действующая на материальную точку при движении ее по объемной поверхности, направлена по нормали к этой поверхности. Это значит, что направление этой векторной величины будет совпадать с направлением градиента текущей точки рассматриваемой поверхности, т. е.  $\overrightarrow{\text{grad}}\Phi = \frac{\Phi}{x}; \frac{\Phi}{y}; \frac{\Phi}{z}$ . Его координаты в сферической системе

координат определяются следующими формулами [9]:

$$\frac{\Phi}{x} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{\Phi}{\sin} \quad \frac{\Phi}{\sin} ; \quad (2.27)$$

$$\frac{\Phi}{y} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{\Phi}{\sin} \quad \frac{1}{\sin} \quad \frac{\Phi}{\sin} ; \quad (2.28)$$

$$\frac{\Phi}{z} \quad \frac{1}{H} \quad \frac{\Phi}{\sin} \quad \frac{1}{\sin} \quad \frac{\Phi}{\sin} . \quad (2.29)$$

Длина этого вектора будет равна:

$$|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi| \sqrt{\frac{\Phi^2}{x^2} + \frac{\Phi^2}{y^2} + \frac{\Phi^2}{z^2}} . \quad (2.30)$$

Тогда в качестве единичного вектора нормальной реакции  $\vec{e}_N$  можно взять вектор с координатами

$$\vec{e}_N = \frac{1}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{x}; \frac{1}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{y}; \frac{1}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{z} ,$$

а значит, в координатной форме ее можно представить в виде

$$\vec{N} = \frac{|\vec{N}|}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{x}; \frac{|\vec{N}|}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{y}; \frac{|\vec{N}|}{|\overrightarrow{\text{grad}}\Phi|} \frac{\Phi}{z} . \quad (2.31)$$

Согласно уравнению (2.8), уравнение поверхности подвижной части камеры смешивания определяется следующим образом:

$$\Phi(x; y; z) = z \cdot \text{tg} \sqrt{x^2 + y^2} . \quad (2.32)$$

Для определения проекций вектора нормальной реакции на оси сферической системы координат воспользуемся следующими формулами [9]:

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = |\vec{N}| \cos(\vec{N}; \vec{O\rho}) \frac{|\vec{N}|}{|\text{grad } \Phi|} \frac{\Phi}{x} \sin \cos_{abc} \frac{\Phi}{y} \sin \sin_{abc} - \frac{\Phi}{z} \cos ; \quad (2.33)$$

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = |\vec{N}| \cos(\vec{N}; \vec{O}^{\wedge}) \frac{|\vec{N}|}{|\text{grad } \Phi|} \frac{\Phi}{x} \cos \cos_{abc} \frac{\Phi}{y} \cos \sin_{abc} - \frac{\Phi}{z} \sin ; \quad (2.34)$$

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = |\vec{N}| \cos(\vec{N}; \vec{O}^{\wedge}) \frac{|\vec{N}|}{|\text{grad } \Phi|} \frac{\Phi}{x} \sin_{abc} \frac{\Phi}{y} \cos_{abc} . \quad (2.35)$$

Вычислим частные производные первого порядка функции  $\Phi(x; y; z)$ :

$$\frac{\Phi}{x} z \text{tg} \theta \sqrt{x^2 + y^2} x 0 \sqrt{x^2 + y^2} x \frac{2x}{2\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} ; \quad (2.36)$$

$$\frac{\Phi}{y} z \text{tg} \theta \sqrt{x^2 + y^2} y 0 \sqrt{x^2 + y^2} y \frac{2y}{2\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} ; \quad (2.37)$$

$$\frac{\Phi}{z} z \text{tg} \theta \sqrt{x^2 + y^2} z \text{tg} \theta z 0 \text{tg} \theta \quad (2.38)$$

и длину этого вектора

$$|\text{grad } \Phi| \sqrt{\frac{x^2}{x^2 + y^2} + \frac{y^2}{x^2 + y^2} + \text{tg}^2 \theta} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \theta} \frac{1}{\cos \theta} . \quad (2.39)$$

С учетом (2.12) формулы (2.36)–(2.39) в сферической системе координат примут следующий вид:

$$\frac{\Phi}{x} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\sin \cos_{abc}}{\sqrt{\sin^2 \cos_{abc}^2 + \sin \sin_{abc}^2}}$$

$$\frac{\cos_{abc}}{\sqrt{\cos^2_{abc} \sin^2_{abc}}} \cos_{abc}; \quad (2.40)$$

$$\frac{\Phi}{y} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\sin_{abc} \sin_{abc}}{\sqrt{\sin_{abc}^2 \cos_{abc}^2 \sin_{abc}^2 \sin_{abc}^2}} \frac{\sin_{abc}}{\sqrt{\cos^2_{abc} \sin^2_{abc}}} \sin_{abc}; \quad (2.41)$$

$$\frac{\Phi}{z} \operatorname{tg} \theta; \quad (2.42)$$

$$\left| \overline{\operatorname{grad} \Phi} \right| \frac{1}{\cos \theta}. \quad (2.43)$$

Тогда на основании выражений (2.40), (2.41), (2.42), (2.43) зависимости (2.33), (2.34) и (2.35) примут следующий вид:

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} \cos_{abc} \sin_{abc} \cos_{abc} \sin_{abc} \sin_{abc} \sin_{abc} \operatorname{tg} \cos_{abc} \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} \sin_{abc} \cos^2_{abc} \sin^2_{abc} \sin_{abc} \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} 0 0; \quad (2.44)$$

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} \cos_{abc} \cos_{abc} \cos_{abc} \sin_{abc} \cos_{abc} \sin_{abc} \operatorname{tg} \sin_{abc} \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} \cos_{abc} \cos^2_{abc} \sin^2_{abc} \frac{\sin^2_{abc}}{\cos_{abc}} \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} \frac{1}{\cos_{abc}} \left| \vec{N} \right|; \quad (2.45)$$

$$np_{\vec{O}} \vec{N} = \left| \vec{N} \right| \cos_{abc} (\cos_{abc}) \sin_{abc} (\sin_{abc}) \cos_{abc} 0. \quad (2.46)$$

Таким образом, вектор нормали в сферических координатах имеет вид

$$\vec{N} 0; \left| \vec{N} \right|; 0. \quad (2.47)$$

Аналогичным образом получим проекцию силы сопротивления движению материальной точки в сферических координатах. Выражение этой силы в зависимости от характера взаимодействия, испытываемого материальной точкой от скольжения по поверхности вращающегося дна камеры смешивания, довольно сложно. Связано это с тем, что материальная точка, помимо местных сопротивлений (шероховатости поверхности и различных преград), испытывает аэродинамические сопротивления, возникающие в результате взаимодействия семян в слое сыпучего материала. Поэтому для упрощения задачи сделаем

предположение о том, что сила  $\vec{F}_c$  направлена в сторону, противоположную вектору скорости материальной точки в ее относительном движении по поверхности вращающегося дна и имеет характер кулоновского трения:

$$\vec{F}_c = -f |\vec{N}| \vec{e}_v, \quad (2.48)$$

где  $f$  – коэффициент трения материальной точки о поверхность рабочего органа;

$f$  – коэффициент трения материальной точки о поверхность рабочего органа;

$\vec{e}_v$  – единичный вектор с направлением вектора скорости.

Согласно формуле (2.22), проекции вектора абсолютной скорости через сферические координаты имеют следующий вид:

$$V_x = \dot{x}, \quad V_y = \dot{y}, \quad V_z = \dot{z} \sin \theta. \quad (2.49)$$

Для определения качественных и количественных показателей центробежного дражиратора необходимо знать характеристики относительного движения семени, т. е. движения относительно дна камеры смешивания. В рассматриваемом случае, когда дно конической формы камеры смешивания вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , изменение долготы точки  $\varphi_{abc}$  определяется функцией

$$\varphi_{abc}(t) = \omega t + \varphi(t), \quad (2.50)$$

где  $\varphi$  – долгота смещения семени относительно дна камеры смешивания, рад.

Тогда первая и вторая производные от данной функции соответственно будут равны:

$$\dot{\varphi}_{abc} = \omega + \dot{\varphi} \quad \text{и} \quad \ddot{\varphi}_{abc} = \ddot{\varphi}. \quad (2.51)$$

С учетом этого единичный вектор, характеризующий направление вектора скорости, может быть записан как

$$\vec{e}_v = \frac{\dot{x}}{|\vec{v}|} \vec{i} + \frac{\dot{y}}{|\vec{v}|} \vec{j} + \frac{\dot{z} \sin \theta}{|\vec{v}|} \vec{k},$$

вектор, характеризующий силу сопротивления, будет представлен через сферические координаты в следующем виде:

$$\vec{F}_c = -f \frac{|\vec{N}|}{|\vec{v}|} \vec{i} - f \frac{|\vec{N}|}{|\vec{v}|} \vec{j} - f \frac{|\vec{N}|}{|\vec{v}|} \vec{k} \sin \theta. \quad (2.52)$$

Так как вектор силы тяжести  $\vec{P}$  направлен вертикально вниз, а его величина  $|\vec{P}| = m g$ , то в сферической системе он будет иметь следующие координаты:

$$\vec{P} = m g \cos \theta ; m g \sin \theta ; 0 , \quad (2.53)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения тела,  $m/c^2$ .

Ввиду того что конусность  $\theta$  поверхности дна является постоянной величиной, соответствующий параметр, характеризующий изменение угла между текущим положением материальной точки и осью вращения, также можно считать постоянным, равным  $\theta = \text{const}$ . С учетом этого можем заключить, что:

$$\dot{\theta} = 0 \text{ и } \ddot{\theta} = 0 . \quad (2.54)$$

С учетом (2.53) и (2.54) величина относительной скорости движения материальной точки будет определяться по формуле

$$|\vec{V}| = \sqrt{\dot{\varphi}^2 (r \sin \theta)^2 + (\dot{\theta} \sin \theta + \dot{\varphi} r \cos \theta)^2} = \sqrt{\dot{\varphi}^2 (r \sin \theta)^2} . \quad (2.55)$$

Тогда закон движения (2.11) рассматриваемой материальной точки в сферической системе координат с учетом формул (2.27), (2.39) и (2.43) можно представить в следующем виде [116, 124]:

$$m_c \ddot{\varphi} + ((\dot{\varphi} \sin \theta)^2 - m_c g \cos \theta) \frac{f |\vec{N}|}{|\vec{V}|} = 0 . \quad (2.56)$$

$$m_c (\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta - m_c g \sin \theta) \frac{f |\vec{N}|}{|\vec{V}|} = 0 ;$$

$$m_c \frac{2}{r} \dot{\varphi} (\dot{\varphi} r \cos \theta) + \frac{f |\vec{N}|}{|\vec{V}|} (\dot{\varphi} r \cos \theta) = 0 .$$

Выразим из второго уравнения системы (2.56) величину нормальной составляющей реакции:

$$|\vec{N}| = m_c \sin \theta (g - \dot{\varphi}^2 r \cos \theta) \quad (2.57)$$

и подставим ее в первое и третье уравнения системы.

Тогда система (2.56), решенная относительно  $\ddot{\varphi}$  и  $\ddot{\theta}$ , примет следующий вид:

$$\ddot{\varphi} = (\dot{\varphi})^2 \sin^2 \alpha - g \cos \alpha \frac{f |\vec{N}|}{m_c |\vec{V}|}. \quad (2.58)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{2}{r_{\text{дн}}} \cdot (\dot{\varphi}) \frac{f |\vec{N}|}{m_c |\vec{V}|} (\dot{\varphi}),$$

или

$$\ddot{\varphi} = (\dot{\varphi})^2 \sin^2 \alpha - g \cos \alpha \frac{f - g \sin \alpha - \frac{1}{2} (\dot{\varphi})^2 \sin 2\alpha}{\sqrt{r_{\text{дн}}^2 (\dot{\varphi})^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (2.59)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{2}{r_{\text{дн}}} \cdot (\dot{\varphi}) \frac{f - g \sin \alpha - \frac{1}{2} (\dot{\varphi})^2 \sin 2\alpha}{\sqrt{r_{\text{дн}}^2 (\dot{\varphi})^2 \sin^2 \alpha}} (\dot{\varphi}).$$

Система дифференциальных уравнений (2.59) может служить основой для моделирования процесса движения семени по вращающемуся дну камеры смешивания, выполненной в форме конической поверхности. Ее анализ показывает, что динамика движения семени по вращающемуся дну конической формы зависит от угловой скорости вращения дна ( $\dot{\varphi}$  рад/с) и коэффициента трения семени о его поверхность  $f$ , а также от конусности дна ( $\alpha$  рад), которая является его конструктивным параметром. В то же время начальное и конечное положения семени при движении по поверхности дна определяются радиусом его меньшего основания  $r_{\text{дн}}$  (м) и его высотой  $H_{\text{дн}}$  (м).

Данные выводы подтверждаются следующими формулами:

$$\frac{r_{\text{дн}}}{\sin \alpha} - \text{начальное положение семени на образующей дна камеры смешивания, м;} \quad (2.60)$$

$$h = r_{\text{дн}} \cos \alpha - \text{вертикальная составляющая начального положения семени по отношению к началу декартовой системы координат, м;} \quad (2.61)$$

$$r_{\text{дн}} \frac{R_{\text{дн}}}{\sin \alpha} - \text{конечное положение семени на образующей дна камеры смешивания, м;} \quad (2.62)$$

$h_k = r_{\text{дн}} \operatorname{ctg} H_{\text{дн}}$  – вертикальная составляющая конечного положения семени по отношению к началу декартовой системы координат, м. (2.63)

Сложность определения текущих декартовых координат и кинематических параметров движения семени внутри вращающегося конического дна заключается в том, что система (2.59) не имеет аналитического решения. Ее можно решить только численно.

Для решения данной системы дифференциальных уравнений использовался метод Рунге – Кутты и расчеты производились в математическом пакете MathCad. Чтобы избежать больших вычислительных погрешностей, шаг разбиения временного интервала  $t$  брался заведомо малым ( $t < 10^{-2}$  с).

Численное решение системы (2.59) позволяет определить:  $\rho_i$  – радиус-вектор текущего положения семени (м) и  $\dot{\rho}_i$  – скорость его изменения в рассматриваемый момент времени (м/с),  $\varphi_i$  – долгота текущего положения семени (рад) и  $\dot{\varphi}_i$  – скорость ее изменения в рассматриваемый момент времени (рад/с). На основании их можно узнать текущие координаты семени в декартовой системе координат и относительную его скорость при движении по подвижной части камеры смешивания.

Результаты, полученные в ходе численного решения системы (2.59), показали, что при правильном выборе конструктивных параметров дна  $r_{\text{дн}}$ ,  $H_{\text{дн}}$  и его угловой скорости семена будут подниматься по его внутренней поверхности, описывая некоторую спиралевидную кривую. При этом основными параметрами, влияющими на динамику подъема потока семян, являются конусность дна и угловая скорость его вращения.

Решение системы (2.59) в математическом пакете MathCad позволило определить минимальные значения угловой скорости и конусности дна, для которых материальная точка (семя) начинает спиралевидное движение вверх, достигает верхней его кромки [118]. Условия начала движения семени вверх по поверхности обратного конуса при заданном коэффициенте трения  $f = 0,3$  определяются графической зависимостью (рис. 2.3).

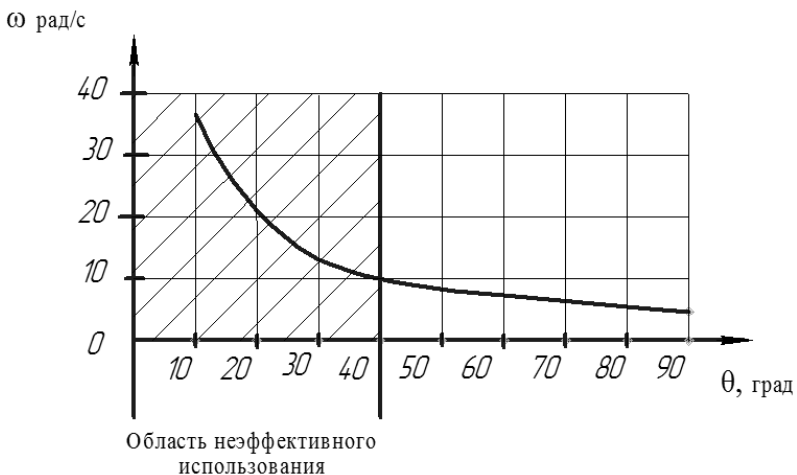


Рис. 2.3. Зависимость наименьшей угловой скорости вращения  $\omega$  дна камеры смешивания, обеспечивающей подъем семян по его поверхности, от угла конусности  $\theta$

Анализ вышеприведенной зависимости показывает, что в интервале изменения конусности дна от  $0$  до  $40^\circ$  для устойчивого подъема семени требуется угловая скорость вращения в  $1,5\text{--}3,5$  раза большая, чем в диапазоне от  $40$  до  $90^\circ$ . С учетом этого при проведении экспериментальных исследований использование конусности дна камеры смешивания до  $40^\circ$  и угловой скорости его вращения менее  $10$  рад/с является неэффективным.

#### 2.4. Моделирование процесса движения семени по вращающемуся дну камеры смешивания

Смоделируем процесс движения семени сахарной свеклы по вращающемуся дну камеры смешивания дражировщика. Расчеты и графический анализ результатов будем производить в математическом пакете MathCad.

В прил. А1 показаны блок исходных данных и расчетный блок для расчета траектории движения семени.

Для определенности предположим, что вращающееся дно камеры смешивания имеет следующие геометрические параметры: радиус

меньшего основания  $r_{\text{дн}} = 0,085$  м, высота  $H_{\text{дн}} = 0,107$  м, конусность  $\theta = 1,016$  рад. Примем частоту вращения дна  $n = 150$  об/мин, ускорение свободного падения тела  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> и коэффициент трения семян  $f = 0,3$ .

Определим те параметры, которые понадобятся для решения системы (2.59) и анализа ее результатов.

Найдем угловую скорость вращения дна камеры смешивания по следующей формуле:

$$\frac{n}{30} = 15,71 \text{ рад/с.} \quad (2.64)$$

Примем, согласно формуле (2.60), исходное положение семени на образующей дна относительно начала координат  $\frac{r_{\text{дн}}}{\sin} = 0,1$  м, а ее вертикальную составляющую, согласно формуле (2.61),  $h \cos = 0,0527$  м.

На основании исходных данных и формулы (2.1) рассчитаем диаметр большего основания вращающегося дна  $R_{\text{дн}} = H_{\text{дн}} \operatorname{tg} r_{\text{дн}} = 0,257$  м. Положение его верхней кромки относительно начала координат определим на основании зависимости  $H_{\text{дн}}^1 \cos = H_{\text{дн}} = 0,159$  м.

В прил. А1 показан блок постановки и численного решения системы дифференциальных уравнений (2.59), определяющей траекторию движения семени по вращающемуся дну камеры смешивания.

Для того чтобы реализовать в MathCad эту систему дифференциальных уравнений, определим вектор начальных условий  $X$ . Для этого за координаты начала движения семени примем  $\rho_0 = 0,1$ ,  $\varphi_0 = 0$  и его скорость, равную 0. Введем оператор дифференцирования  $D(t, X)$ , характеризующий правую часть системы. Решим систему с помощью встроенной функции MathCad  $rkfixed()$ , аргументами которой являются:  $X$  – вектор начальных условий,  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно начальное и конечное значения временного интервала,  $Npoint$  – число разбиений временного интервала  $[t_1; t_2]$ ,  $D$  – оператор дифференцирования.

В качестве алгоритма численного решения дифференциальных уравнений функция  $rkfixed()$  использует метод Рунге – Кутты четвертого порядка точности, а с выбором большого числа разбиений временного интервала получается высокая точность вычислений.

Решение системы (2.59) в MathCad представляет собой матрицу (прил. А1), содержащую пять столбцов, первый из которых характеризует временной интервал (с), второй – радиус-вектор точки (м), третий – долготу точки (рад), четвертый – скорость радиус-вектора точки (м/с), пятый – скорость долготы точки (рад/с). Результаты решения модели (2.59) позволяют полностью охарактеризовать траекторию движения семени по дну камеры смешивания и изменение его относительной скорости в процессе движения.

В процессе реализации методики решения системы дифференциальных уравнений (2.59) требовалось знать время достижения семенем верхней кромки вращающегося дна. Для этого был использован метод интерполяции функции. Его исполнение в MathCad для приведенной задачи приведено в прил. А2.

Для приведенных исходных данных изменение высоты поднятия семени по вращающемуся дну описывалось функцией

$$h_i(t) = 0,0546 + 0,016t + 0,00186t^2 + 0,00038t^3.$$

Тогда, зная высоту дна  $H_{\text{дн}} = 0,107$  м, время движения по нему определяли из уравнения  $h_i(t) - H_{\text{дн}} = 0$ . Оно принималось равным 2,3328 с.

Согласно графическим зависимостям и результатам расчетов, приведенным в прил. А3, можно сделать вывод о том, что при заданных конструктивных и технологических параметрах семя совершает движение по спирали вверх, повторяя контуры вращающегося дна. При этом оно делает три оборота и достигает верхней кромки устройства за время 2,33 с и затем переходит на цилиндрический неподвижный корпус камеры смешивания, обладая относительной скоростью движения, равной 1,67 м/с.

## **2.5. Исследование движения семени по неподвижной цилиндрической поверхности камеры смешивания**

Предположим, что в некоторый момент времени  $t_1$  материальная точка (семя) осуществляет переход на внутреннюю поверхность неподвижного цилиндрического корпуса камеры смешивания с радиусом  $R_{\text{дн}}$  (рис. 2.4).

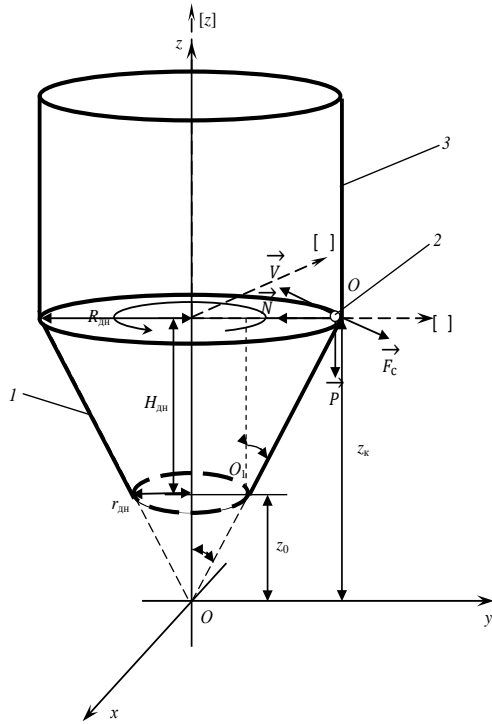


Рис. 2.4. Схема для расчета динамики движения семени по неподвижному цилиндрическому корпусу камеры смешивания:  
 1 – вращающееся дно камеры смешивания; 2 – семя;  
 3 – неподвижный цилиндрический корпус

Тогда ее поверхность будет определяться уравнением

$$\Phi(x, y, z) = 0, \quad (2.65)$$

где  $\Phi(x, y, z) = x^2 + y^2 - R_{\text{дн}}^2$ .

Так как корпус неподвижен, семя, находящееся в точке с координатами  $(x_1; y_1; z_1)$ , дальнейшее свое движение производит под действием следующих сил: силы тяжести  $\vec{P}$ , нормальной реакции поверхности корпуса  $\vec{N}$ , силы сопротивления движению семян  $\vec{F}_c$ , обладая при этом начальной скоростью  $\vec{V}_1 (V_x; V_y; V_z)$ . Тогда закон движения семени

по неподвижному цилиндрическому корпусу камеры смешивания будет иметь следующий вид:

$$m_c \vec{a}_c = \vec{P} - \vec{N} - \vec{F}_c. \quad (2.66)$$

Для упрощения расчетов движение семени по корпусу будем рассматривать в цилиндрической системе координат  $Oz$ . Ось  $O$  направим по радиусу неподвижного цилиндрического корпуса. Значение по этой оси будет характеризовать величину радиус-вектора текущего положения материальной точки. Ось  $O$  будет характеризовать изменение угла поворота семени в горизонтальной плоскости  $xOy$ . Ось  $Oz$  направим вверх по оси симметрии корпуса. Ее значение будет характеризовать изменение высоты поднятия семени относительно начального его положения на корпусе.

Связь между декартовыми прямоугольными и цилиндрическими координатами текущего местоположения точки будем осуществлять на основании зависимостей:

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi; \\ y &= \rho \sin \varphi; \\ z &= z, \end{aligned} \quad (2.67)$$

где  $\rho$  – полярный радиус точки, м;  
 $\varphi$  – полярный угол точки, рад;  
 $z$  – аппликата точки, м.

Определим коэффициенты Ламе, функцию Лагранжа и скорость семени [115] для рассматриваемого случая с учетом связи (2.67). Получим:

$$H = \sqrt{\frac{x^2}{\rho^2} + \frac{y^2}{\rho^2} + \frac{z^2}{z^2}} \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = 1; \quad (2.68)$$

$$H = \sqrt{\frac{x^2}{\rho^2} + \frac{y^2}{\rho^2} + \frac{z^2}{z^2}} \sqrt{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} = 1; \quad (2.69)$$

$$H_z = \sqrt{\frac{x^2}{z^2} + \frac{y^2}{z^2} + \frac{z^2}{z^2}} \sqrt{0 + 0 + 1} = 1; \quad (2.70)$$

$$L = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} H^2 \dot{\rho}^2 + \frac{1}{2} H_z^2 \dot{z}^2 = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} \dot{\rho}^2 + \frac{1}{2} \dot{z}^2; \quad (2.71)$$

$$|\vec{V}| = \sqrt{\dot{z}^2} \quad (2.72)$$

Тогда с учетом (2.13) проекции вектора ускорения семени на оси цилиндрической системы координат определяются как

$$a_p = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{z} = \frac{L}{z^2} \left( -\dot{z} \frac{1}{z} - \ddot{z} \right) = -\frac{L}{z^3} (\dot{z} + z \ddot{z}) \quad (2.73)$$

$$a_a = \frac{1}{H} \frac{d}{dt} \frac{L}{z} = \frac{L}{z^2} \left( -\dot{z} \frac{1}{z} - \ddot{z} \right) = -\frac{L}{z^3} (\dot{z} + z \ddot{z}) \quad (2.74)$$

$$a_z = \frac{1}{H_z} \frac{d}{dt} \frac{L}{z} = \frac{L}{z^2} \left( -\dot{z} \frac{1}{z} - \ddot{z} \right) = -\frac{L}{z^3} (\dot{z} + z \ddot{z}) \quad (2.75)$$

В случае, когда семя движется без отрыва от поверхности корпуса ( $N > 0$ ),  $\dot{z} = R_{дн}$ , а значит,  $\ddot{z} = 0$ . Поэтому формулы (2.72) и (2.73)–(2.75) упрощаются. С учетом этих упрощений величина относительной скорости и ускорения семени в цилиндрической системе координат определяются по формулам:

$$|\vec{V}| = \sqrt{R_{дн}^2} = R_{дн} \quad (2.76)$$

$$|\vec{a}| = \sqrt{(R_{дн})^2} = R_{дн} \quad (2.77)$$

Выразим проекции сил, действующих на семя, через цилиндрические координаты. Нетрудно заметить, что сила тяжести семени, движущегося по неподвижной цилиндрической поверхности, будет иметь следующие проекции:

$$P_x = 0, P_y = 0, P_z = m_c g \quad (2.78)$$

Силу сопротивления движению семени  $\vec{F}_c$  представим как произведение ее величины  $|\vec{F}_c| = f |\vec{N}|$  на направляющие косинусы. Параметр  $f$  в данном случае определяет коэффициент трения семени о поверхность корпуса, а  $|\vec{N}|$  – величину нормальной реакции, действующей на семя. При этом будем полагать, что сила сопротивления направлена в

сторону, противоположную направлению относительной скорости семени. С учетом этого проекции силы сопротивления примут следующий вид:

$$F_c = 0, F_{c_z} = \frac{|\bar{N}| f R_{\text{дн}}}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}, F_{c_r} = \frac{|\bar{N}| f}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}. \quad (2.79)$$

Рассмотрим проекции силы нормальной реакции поверхности корпуса на семя. В цилиндрической системе координат ее можно представить в виде

$$N = |\bar{N}|, N_r = 0, N_z = 0.$$

С учетом вышесказанного, движение семени по неподвижному корпусу в цилиндрической системе координат будет описываться системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} m_c \ddot{z} &= \frac{|\bar{N}| f}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}; \\ m_c R_{\text{дн}} \dot{\theta} &= |\bar{N}|; \\ m_c \ddot{z} &= m_c g - \frac{|\bar{N}| f}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}. \end{aligned} \quad (2.80)$$

Второе уравнение системы (2.80) определяет величину нормальной реакции.

С учетом ее значения два других уравнения системы примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= \frac{R_{\text{дн}} f}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}; \\ \ddot{z} &= g - \frac{R_{\text{дн}} f}{\sqrt{R_{\text{дн}}}} \dot{z}. \end{aligned} \quad (2.81)$$

Система дифференциальных уравнений (2.81) может служить основой для моделирования процесса движения семени по неподвижному цилиндрическому корпусу камеры смешивания. Так как по данному элементу семя движется по инерции, приданной ему вращающимся дном, то кроме приведенных в разделе 2.2 параметров на его движение

будет оказывать влияние радиус корпуса камеры смешивания  $R_{\text{дн}}$ , или габариты этой камеры.

Численное решение системы дифференциальных уравнений (2.81) показывает, что существует широкий диапазон изменения конструктивных и технологических параметров работы камеры смешивания, при которых выделяются два участка траектории движения семени: поднятие по вращающемуся дну камеры смешивания и подъем до предельной высоты по стенке камеры смешивания ( $H_{\text{п}}$ ).

В момент отрыва от вращающегося дна семя движется по цилиндрической образующей корпуса камеры смешивания, совершая подъем на высоту  $H_{\text{п}}$ , а затем, когда инерции становится недостаточно, начинает опускаться вниз. Такое движение семян не удовлетворяет условию интенсификации изучаемого процесса, так как не позволяет им активно перемешиваться и при движении порции семян в камере смешивания приводит к образованию вращающегося шлейфа из семян на корпусе, что подтверждено опытами. В связи с этим был сделан вывод о необходимости включения в конструкцию установки активизирующего процесс устройства – лопастного отражателя семян.

## 2.6. Моделирование процесса движения семени по корпусу центробежного дражировщика

Смоделируем ситуацию, при которой семя сахарной свеклы, поднявшись по вращающемуся коническому дну, переходит на неподвижный цилиндрический корпус с радиусом  $R_{\text{дн}} = 0,257$  м. Его начальное местоположение на корпусе во введенной в разделе 2.4 цилиндрической системе координат через параметры системы (2.59) будет определяться согласно зависимостям:

$$\varphi_0 = \arccos \frac{r_{\text{к}} \sin \varphi_0}{R_{\text{дн}} \cos \varphi_0} ; \quad (2.82)$$

$$z_0 = R_{\text{к}} \cos \varphi_0 , \quad (2.83)$$

где  $\varphi_0$ ,  $z_0$  – начальные значения полярного угла и аппликаты семени в цилиндрической системе координат;

$r_{\text{к}}$  – радиус-вектор точки схода со дна камеры смешивания, м;

$\varphi_{\text{к}}$  – долгота точки схода со дна камеры смешивания, рад.

При этом проекции скорости семени на оси цилиндрической системы координат можно принять равными:

$$\dot{z}_0 \quad \dot{z}_k \quad \dot{z}_k \quad ; \quad (2.84)$$

$$\dot{z}_0 \quad \dot{z}_k \quad \dot{z}_k \quad \sin \quad , \quad (2.85)$$

где  $\dot{z}_0, \dot{z}_k$  – начальные проекции вектора скорости семени в цилиндрической системе координат;

$\dot{z}_k$  – скорость радиус-вектора точки схода со дна камеры смешивания, м/с;

$\dot{z}_k$  – скорость изменения долготы точки схода со дна камеры смешивания, рад/с.

В прил. А4 показан блок постановки и численного решения системы дифференциальных уравнений (2.81) в MathCad, определяющей траекторию движения семени по цилиндрическому корпусу камеры смешивания.

При решении системы (2.81) в MathCad по методике, представленной в разделе 2.3, были получены следующие результаты движения семени по корпусу камеры смешивания (прил. А5).

Анализ этих результатов показывает, что при заданных в разделе 2.3 конструктивных и технологических параметрах в течение 0,17 с семя совершает подъем по цилиндрическому корпусу на высоту 0,142 м от кромки вращающегося дна. При этом его скорость уменьшается до нуля и начинается падение вниз. Для достижения семени кромок вращающегося дна ему требуется 0,34 с.

Результаты решения модели (2.88) позволяют описать траекторию движения семени по корпусу камеры смешивания с учетом его движения по вращающемуся дну, а также установить изменение его относительной скорости в процессе такого движения.

## **2.7. Исследование движения семени при попадании на лопасть отражателя**

Рассмотрим движение семени по элементу цилиндрической формы камеры смешивания с переходом его на лопасть отражателя (рис. 2.5). Сделаем привязку лопасти отражателя к прямоугольной декартовой системе координат. Для этого начало координат поместим в нижнюю точку крепления лопасти к корпусу камеры смешивания, ось  $Ox$  направим по лопасти отражателя, ось  $Oy$  – перпендикулярно к ей, а ось  $Oz$  – вверх по линии ее крепления.

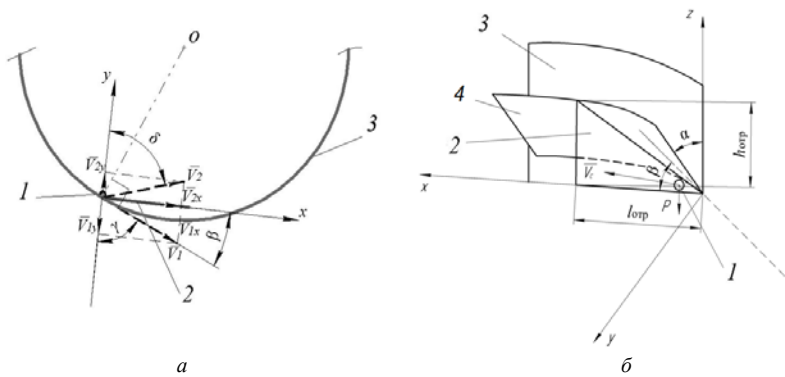


Рис. 2.5. Схема для расчета траектории движения семени при попадании на лопасть отражателя (а) и схема общего вида лопасти (б):  
 1 – семя; 2 – лопасть отражателя; 3 – корпус камеры смешивания;  
 4 – отсекающая поверхность;  $\gamma$  – угол падения;  $\delta$  – угол отражения;  
 $\beta$  – угол наклона лопасти

До момента попадания на лопасть отражателя семя движется со скоростью  $\vec{V}_1$ , по стенке корпуса камеры смешивания. При попадании на лопасть отражателя семя испытывает удар о лопасть и продолжает движение со скоростью  $\vec{V}_2$  под углом  $\delta$  к нормали поверхности лопасти.

По теореме импульсов в проекциях на выбранные оси [104] получим следующие уравнения:

на ось  $Ox$

$$m_c \vec{V}_{2x} - m_c \vec{V}_{1x} = \vec{S}_x, \quad (2.86)$$

где  $\vec{V}_{2x}$  – проекция скорости на ось  $Ox$  после отражения от лопасти, м/с;

$\vec{V}_{1x}$  – проекция начальной скорости на ось  $Ox$ , м/с;

$\vec{S}_x$  – проекция импульса силы на ось  $Ox$ , Н·с;

на ось  $Oy$

$$m_c \vec{V}_{2y} - m_c \vec{V}_{1y} = \vec{S}_y, \quad (2.87)$$

где  $\vec{V}_{2y}$  – проекция скорости на ось  $Oy$  после отражения от лопасти, м/с;

$\vec{V}_{1y}$  – проекция начальной скорости на ось  $Oy$ , м/с;

$\vec{S}_y$  – проекция импульса силы на ось  $Oy$ , Н·с.

В фазе деформации нормальная составляющая скорости меняется от  $V_{1y}$  до 0, следовательно:

$$\bar{S}_{1y} = 0 = m_c \bar{V}_{1y}. \quad (2.88)$$

В фазе восстановления составляющая скорости будет иметь следующий вид:

$$\bar{S}_{2y} = m_c \bar{V}_{2y}. \quad (2.89)$$

Согласно теории Ньютона [104], отношение величин проекций относительной скорости тел после удара и до удара на направление общей нормали к поверхности тел в точке их соприкосновения есть постоянная величина  $k$  (коэффициент восстановления), зависящая от материала соударяющихся тел:

$$k = \frac{\bar{S}_{2y}}{\bar{S}_{1y}} = \frac{\bar{V}_{2y}}{\bar{V}_{1y}}. \quad (2.90)$$

Коэффициент восстановления характеризует, насколько восстанавливается нормальная составляющая скорости после удара. Изменяется в пределах от 0 до 1.

Если удар абсолютно упругий, то  $k = 1$ , если удар абсолютно неупругий, то  $k = 0$ . При дражировании коэффициент  $k$  зависит от степени увлажнения семян во время обработки, его значение необходимо определить экспериментально для заданных условий.

Для касательных составляющих скоростей вводят коэффициент мгновенного трения. Однако влияние трения значительно меньше, чем влияние упругости, следовательно, этим коэффициентом можно пренебречь.

Тогда, учитывая вышеприведенные уравнения, получим:

$$\bar{S}_y = m_c \bar{V}_{1y} (1 + k). \quad (2.91)$$

Связь между углом падения  $\gamma$  и углом отражения  $\delta$  можно получить из следующих соотношений:

$$|\bar{V}_{1x}| = |\bar{V}_{2x}|, \text{ или } |\bar{V}_2| \sin \gamma = |\bar{V}_1| \sin \delta; \quad (2.92)$$

$$|\bar{V}_{2y}| = k |\bar{V}_{1y}|, \text{ или } |\bar{V}_2| \cos \delta = |\bar{V}_1| k \sin \gamma. \quad (2.93)$$

Разделив выражение (2.92) на (2.93), получим:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{k}. \quad (2.94)$$

После отражения от лопасти, без учета силы сопротивления воздуха, семена будут двигаться по закону [117]:

$$\begin{aligned} m_c \cdot x_c &= 0; \\ m_c \cdot y_c &= 0; \\ m_c \cdot z_c &= m_c \cdot g, \end{aligned} \quad (2.95)$$

где  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$  – проекции ускорений на соответствующие оси координат, м/с<sup>2</sup>.

Сократим в уравнениях системы  $m_c$  и дважды проинтегрируем их по времени движения семени. Тогда общее решение первого дифференциального уравнения системы будет иметь следующий вид:

$$x_c = C_1 \cdot t + C_2, \quad (2.96)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – произвольные постоянные.

Зависимость (2.96) в общем виде описывает перемещение семени вдоль оси  $Ox$ . Для того чтобы определить  $C_1$ ,  $C_2$ , воспользуемся начальными условиями:  $x_c(0) = x_0 = 0$ ;  $V_x(0) = |\vec{V}_{2x}|$ . Так как  $x_c = C_1 \cdot t + C_2$ , то  $C_1 = |\vec{V}_{2x}|$ . Тогда зависимость (2.96) примет следующий вид:  $x_c = |\vec{V}_{2x}| \cdot t + C_2$ . Так как  $x_c(0) = x_0 = 0$ , то  $x_0 = |\vec{V}_{2x}| \cdot 0 + C_2$ , а значит,  $C_2 = x_0 = 0$ . Таким образом, перемещение семени вдоль оси  $Ox$  для рассматриваемого случая описывается соотношением

$$x_c = |\vec{V}_{2x}| \cdot t + |\vec{V}_1| \cos \beta \cdot t. \quad (2.97)$$

Поступая аналогичным образом, можно записать, что изменение вектора перемещения вдоль оси  $Oy$  подчиняется зависимости

$$y_c = |\vec{V}_{2y}| \cdot t + |\vec{V}_1| k \sin \beta \cdot t. \quad (2.98)$$

Перемещение семени вдоль оси  $Oz$  подчиняется зависимости

$$z_c = g \cdot t^2. \quad (2.99)$$

Дважды проинтегрировав данное уравнение, получим:

$$z_c = \frac{g \cdot t^2}{2} + C_3 \cdot t + C_4. \quad (2.100)$$

При  $z(0) = z_0$  и  $z_c(0) = |\vec{V}_z^0|$  получим  $V_z^0 = -g \cdot 0 + C_3$ , откуда  $C_3 = |\vec{V}_z^0|$ .

Тогда  $z_k(0) = z_0 - \frac{g}{2} 0^2 - \sqrt{V_z^0} 0 = C_4$ , откуда  $C_4 = z_0$ . Следовательно, перемещение семени вдоль оси  $Oz$  будет определяться следующим образом:

$$z_c = \frac{g}{2} t^2 - \sqrt{V_z^0} t + z_0. \quad (2.101)$$

В результате аналитических исследований были получены зависимости (2.97), (2.98), (2.101), позволяющие описать траекторию движения материальной точки после отражения от лопасти отражателя предлагаемой конструкции.

Для использования этих зависимостей необходимо экспериментальным путем определить коэффициент восстановления  $k$ . Это позволит моделировать процесс движения семени через лопасть отражателя, а значит, объяснить влияние кинематических параметров процесса его движения в камере смешивания на качественные и количественные показатели процесса дражирования.

## 2.8. Теоретическое обоснование конструктивных параметров лопастного отражателя

Включение в конструкцию предлагаемой установки лопастного отражателя способствует интенсификации рассматриваемого процесса. Данный элемент позволяет:

- 1) исключить движение семян в виде вращающегося шлейфа, при котором их перемешивание практически не происходит;
- 2) увеличить площадь распространения и глубину проникновения вводимых компонентов в массу обрабатываемой порции семян;
- 3) создать благоприятные условия протекания процессов перемешивания и наслаивания путем активизации движения массы семян, при котором происходит взаимное перемещение компонентов с постоянным взаимодействием их с элементами конструкции камеры смешивания [119].

Лопастной отражатель включает в себя отсекающую поверхность 4 и лопасти 2 (см. рис. 2.5, б).

Отсекающая поверхность представляет собой обратный усеченный конус высотой  $h_{отр}$ , меньшее основание которого направлено внутрь рабочей камеры под углом  $\alpha$ , а большее состыковано с цилиндрическим корпусом 3. По всей длине конуса равномерно зафиксированы  $k_{от}$  отражающих лопастей, которые образуют в точках закрепления

углы с касательными плоскостям корпуса. Каждая лопасть отражателя имеет форму прямоугольного треугольника с меньшим катетом, равным  $h_{отр}$ , характеризующим ее высоту, большим катетом, равным  $l_{отр}$ , характеризующим ее длину, и гипотенузой, закрепленной к образующей отражателя. При такой конструкции лопастного отражателя высота его отсекающей поверхности равна  $h_{отр}$ , а ее конусность определяется по формуле

$$= \arctg \frac{h_{отр}}{l_{отр}} \cdot \quad (2.102)$$

Эффективную работу лопастного отражателя определяют следующие условия:

- 1) семена должны отражаться от лопастей и создавать «семенную завесу»;
- 2) размещение лопастей по круговому контуру корпуса и их геометрия должны обеспечить достаточную глубину обработки семенного потока химическими компонентами оболочки;
- 3) потоки семян при отражении от лопастей не должны пересекаться;
- 4) семена после отражения от лопастей не должны попадать на дисковый распылитель.

Первое условие может быть обеспечено за счет подбора высоты установки лопастного отражателя. Очевидно, что эта величина должна изменяться в пределах от 0 до  $H_n$  и ее оптимальные значения целесообразно определить на основании экспериментов с учетом обеспечения наилучшего протекания процесса дражирования.

Выполнение всех последующих условий определяется конструктивными параметрами лопасти:  $l_{отр}$ ,  $h_{отр}$  и их количеством  $k_{от}$ . С целью уменьшения количества факторов, влияющих на изучаемый процесс, было проведено их теоретическое осмысление.

Количество лопастей  $k_{от}$  в отражателе отвечает за распределение всего потока семян по зонам, где должны происходить однотипные процессы движения для создания «семенной завесы».

Выделенные зоны должны обеспечивать равномерность перераспределения семян, с одной стороны, а с другой – исключать их столкновение в местах схода с лопастей. При этом количество лопастей не должно усложнять конструкцию лопастного отражателя. На основании

этого было сделано предположение о том, что количество лопастей должно быть четным значением не более 12 шт.

Угол наклона лопасти определяет глубину обработки семян, взаимодействие потоков различных зон и влияет на потери его скорости при попадании на лопасть. В качестве глубины обработки рассматривалось максимальное отклонение семян от стенок корпуса при отражении от лопасти. В случае, когда удар семян о лопасть неупругий (коэффициент  $k = 0$ , угол  $\delta = 90^\circ$ ), они будут двигаться вдоль лопасти, при этом будет определена минимальная глубина.

Для теоретического анализа этого параметра в своих исследованиях использовали схему для расчета глубины обработки семенного потока в зависимости от угла наклона лопасти отражателя (рис. 2.6).

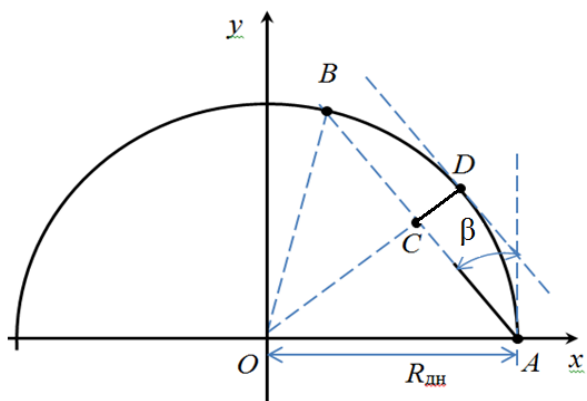


Рис. 2.6. Схема для определения влияния угла наклона лопасти на глубину обработки семенного потока  $CD$

Рассматривали лопасть отражателя внутри окружности радиуса камеры смешивания  $R_{\text{дн}}$ , направленную под углом к ее касательной в точке крепления  $A (R_{\text{дн}}; 0)$ . При таком расположении лопасти возможное максимальное отклонение определялось длиной отрезка  $CD$ , т. е. расстоянием между серединой хорды  $AB$  и серединой одноименной дуги  $AB$  окружности. В данном случае окружность, характеризующая корпус камеры смешивания, задавалась уравнением

$$x^2 + y^2 = R_{\text{дн}}^2.$$

Фрагмент ее, лежащий в первой и второй четвертях координатной плоскости, определялся уравнением

$$y = \sqrt{R_{\text{дн}}^2 - x^2}.$$

Прямая, характеризующая расположение лопасти и содержащая хорду  $AB$ , задавалась функцией

$$y = \text{ctg} (R_{\text{дн}} x). \quad (2.103)$$

В результате решения уравнения

$$\sqrt{R_{\text{дн}}^2 - x^2} = \text{ctg} (R_{\text{дн}} x) \quad (2.104)$$

при ограничениях  $R_{\text{дн}} x \leq R_{\text{дн}}$  были установлены координаты точки  $B(R_{\text{дн}} \cos 2; R_{\text{дн}} \sin 2)$ . На основании полученного результата и того, что точка  $D$  является серединой отрезка  $AB$ , были найдены координаты точки  $D(R_{\text{дн}} \cos; R_{\text{дн}} \sin)$ . Величина определялась как расстояние между точкой  $D$  и прямой:

$$|CD| = \frac{|R_{\text{дн}} \text{ctg} \cos - R_{\text{дн}} \sin - R_{\text{дн}} \text{ctg}|}{\sqrt{\text{ctg}^2 + 1}} R_{\text{дн}} (1 - \cos). \quad (2.105)$$

Изменение параметра в зависимости от угла наклона лопасти при  $R_{\text{дн}} = 0,257$  м показано на рис. 2.7 [119].

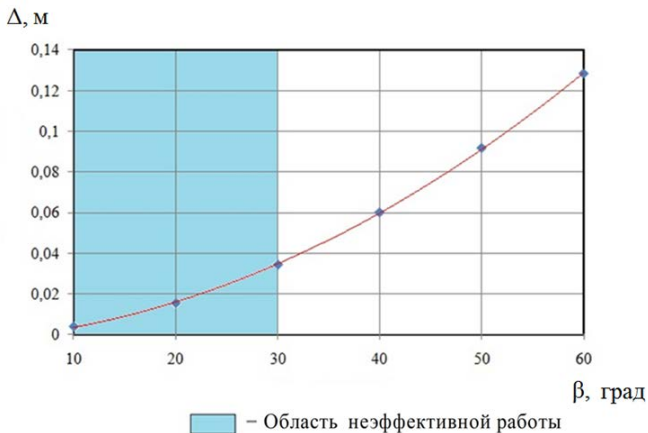


Рис. 2.7. Зависимость глубины обработки семян  $\Delta$  химическими компонентами от угла  $\beta$  наклона лопасти отражателя

Ее анализ позволил сделать вывод о том, что с увеличением угла наклона лопасти увеличивается и глубина обработки, причем она становится значимой при углах более  $30^\circ$ .

Верхнюю границу изменения угла наклона лопасти определяли из условия минимизации потерь скорости семени при входе его на лопасть. Потерю скорости с учетом зависимости (2.92) от угла наклона лопасти можно представить как  $(1 - \cos\beta) 100$ . Она характеризует потерю инерции семени, зависящую только от угла наклона лопасти. Теоретический анализ показал, что при возрастании угла наклона лопасти существенно снижается скорость семени (рис. 2.8) [119].

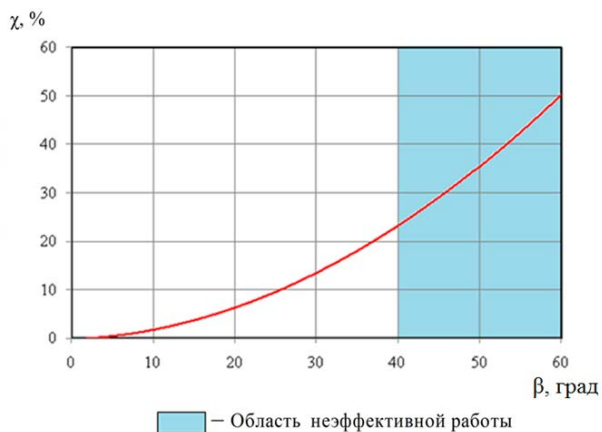


Рис. 2.8. Зависимость потери скорости  $\chi$  семени при входе на лопасть от угла  $\beta$  наклона лопасти

Так, при угле  $40^\circ$  входная скорость семени становится меньше на 23,4 %. Этот факт говорит о том, что уже при значениях  $\beta = 40^\circ$  происходит значительный удар семени о лопасть и потеря его инерции. В свою очередь, это снижает эффективность работы лопасти и может негативно отразиться на качестве получаемого продукта.

Так как угол наклона лопасти изменяется в узких границах от  $30$  до  $40^\circ$ , то для упрощения анализа изучаемого процесса его можно зафиксировать на среднем уровне, т. е.  $35^\circ$ .

Основными параметрами лопастного отражателя, оказывающими влияние на процесс дражирования семян, являются:  $H_{от}$  – высота установки лопастного отражателя,  $\kappa_{от}$  – количество лопастей,  $\beta$  – угол

наклона лопасти,  $l_{отр}$  – длина лопасти,  $h_{отр}$  – высота лопасти. Теоретический анализ показал, что параметр можно принять равным  $35^\circ$ , а в качестве первичных границ варьирования остальных параметров могут выступать:  $H_{от}$  – от 0 до  $H_{п}$ ,  $\kappa_{от}$  – четное число, изменяющееся до 12 шт.,  $l_{отр}$  и  $h_{отр}$  – величины, которые зависят от порции семян и габаритов камеры смешивания. Рациональные значения этих параметров должны быть определены в ходе экспериментальных исследований при условии наилучшего протекания изучаемого процесса.

## 2.9. Моделирование полета семени после прохождения лопасти отражателя

Смоделируем ситуацию, при которой семя сахарной свеклы, поднявшись по вращающемуся коническому дну, переходит с неподвижного цилиндрического корпуса на лопасть отражателя (рис. 2.9) и совершает дальнейшее свое движение с учетом фиксированного коэффициента восстановления.

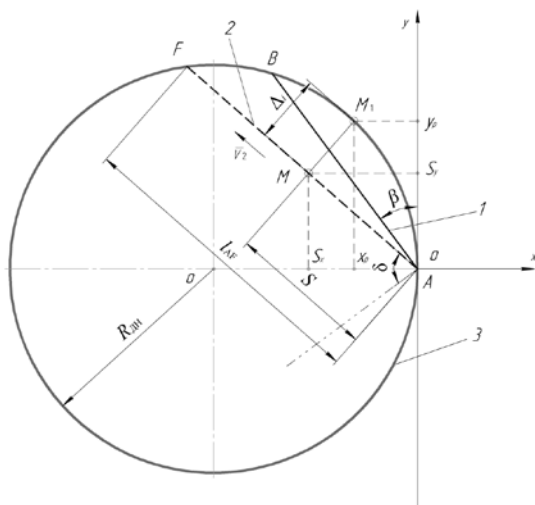


Рис. 2.9. Схема для моделирования траектории движения семени при попадании на лопасть отражателя:  
 1 – линия установки лопасти; 2 – траектория движения семени;  
 3 – корпус камеры смешивания;  $\delta$  – угол отражения;  
 $\beta$  – угол наклона лопасти;  $R_{ш}$  – радиус камеры смешивания

Максимальная длина траектории движения семени  $AF$  будет определяться по зависимости

$$l_{AF} = 2 R_{\text{дн}} \cos(\quad). \quad (2.106)$$

Уравнение линии установки лопасти  $AB$  можно представить в следующем виде:

$$y = \operatorname{tg}(90 \quad) x \quad \operatorname{ctg} \quad x. \quad (2.107)$$

Тогда уравнение траектории движения семени в плоскости  $xOy$  можно определить как

$$y = \operatorname{tg}(180 \quad) x \quad \operatorname{tg}(\quad) x. \quad (2.108)$$

Используя схему для расчета (см. рис. 2.9), можно определить координаты точки  $M$  на траектории движения семени  $AF$  с учетом  $S$ , конкретного перемещения по ней. Эти координаты будут иметь следующий вид:

$$M ( S \cos(\quad) \quad S \sin(\quad)$$

Уравнение прямой, перпендикулярной к траектории движения семени и проходящей через точку  $M$ , можно представить следующими уравнениями:

$$y \quad S \sin(\quad) x \quad \operatorname{ctg}(\quad) (x \quad S \cos(\quad)), \quad (2.109)$$

или

$$y \quad \operatorname{ctg}(\quad) x \quad \frac{S}{\sin(\quad)}. \quad (2.110)$$

Уравнение фрагмента окружности, определяющей корпус камеры смешивания, имеет вид:

$$y = \sqrt{R_{\text{дн}}^2 - (x - R_{\text{дн}})^2}. \quad (2.111)$$

Для определения координат точки  $M_1$  необходимо решить систему уравнений, состоящую из уравнений (2.110) и (2.111). Ее решение позволяет определить координаты искомой точки  $M_1 (x_p; y_p)$ .

Тогда отклонение семени от стенки камеры смешивания  $\Delta_i$  будет определяться по формуле

$$\Delta_i = \frac{|\operatorname{tg}(\quad) x_p - y_p|}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(\quad) + 1}}. \quad (2.112)$$

Связь между отклонением семени от стенки камеры смешивания  $\Delta_i$  при отрыве от лопасти отражателя и изменением его высоты до дна  $z_i$  при условии, что лопасть установлена непосредственно над дном ( $H_{\text{от}} = 0$ ), определяется зависимостью

(2.113)

$$z_{ди} = \frac{i}{\operatorname{tg} \frac{\theta}{180}}.$$

На основании формулы (2.113) для камеры смешивания с радиусом  $R_{\text{дн}} = 0,257$  м и конусностью дна  $\theta = 60^\circ$  при фиксированных коэффициентах восстановления  $k$  были определены точечные зависимости высоты нахождения семени до дна  $z_{\text{д}}$  от длины его горизонтального перемещения  $S$ . Результаты аппроксимации этих зависимостей выражены полиномами второй степени  $z_{\text{д}}(S)$ , их статистическая оценка подтверждена коэффициентами детерминации (рис. 2.10).

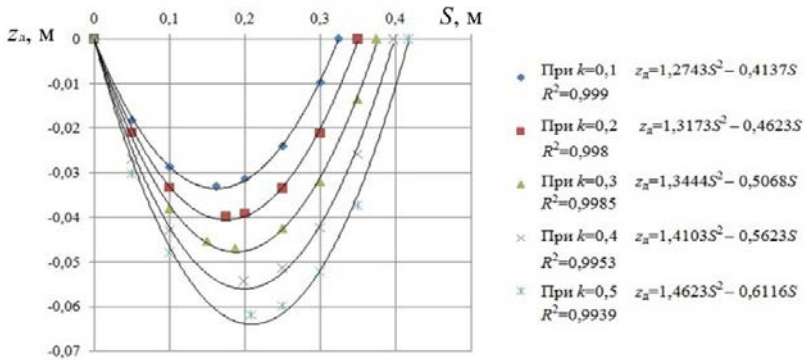


Рис. 2.10. Диаграмма сечений конического дна камеры смешивания, соответствующих траекториям полета семени при различных коэффициентах восстановления семян

Полученные зависимости позволили моделировать процесс падения семени на дно в математическом пакете MathCad, т. е. определять кинематические параметры этого падения и траекторию при заданных начальных условиях. Так, при следующих условиях входа семени на лопасть отражателя: скорости входа  $V_1 = 2$  м/с; коэффициенте восстановления  $k = 0,4$ ; угле наклона лопасти  $\beta = 35^\circ$ ; радиусе камеры смешивания  $R_{\text{дн}} = 0,257$  м; конусности дна  $\theta = 60^\circ$ ; высоте установки лопастного отражателя  $H_{\text{от}} = 0,03$  м – высота полета семени составит  $z_1 = 0,085$  м при времени полета  $t_1 = 0,132$  с (прил. А6).

С помощью полученных моделей можно определить точное местоположение частицы в пространстве в любой момент времени с начала отражения от лопасти до соприкосновения с дном. Тем самым, корректируя входные параметры, можно скоординировать необходимую траекторию движения семени для наилучшего протекания процесса дражирования.

## 2.10. Расчет капельного потока связующей жидкости в камере смешивания

В предлагаемой установке для распыления связующей жидкости применялся дисковый распылитель (рис. 2.11). Он позволял в зоне обработки организовать кольцевой поток химических компонентов, перемещающийся перпендикулярно к массе падающих семян. Такой способ ввода жидких компонентов является наиболее простым и универсальным для данного типа машин.

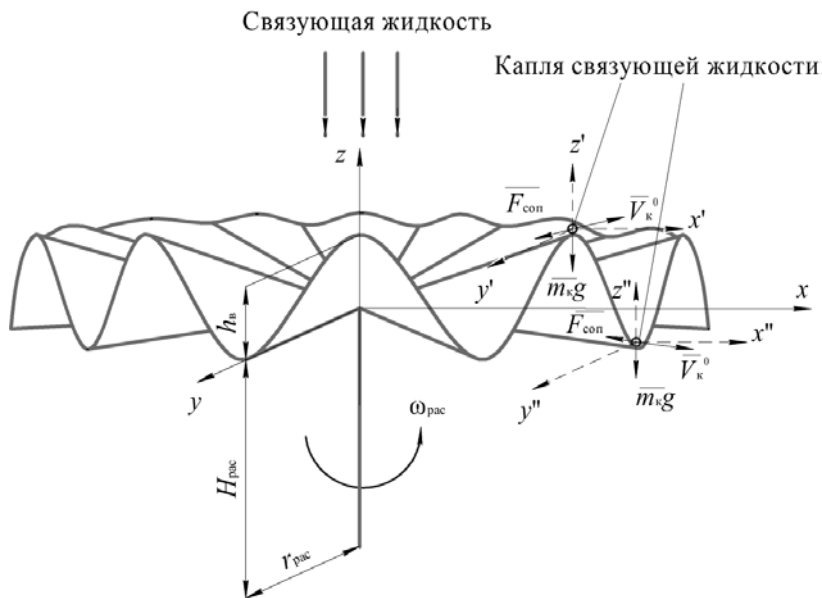


Рис. 2.11. Схема сил, действующих на каплю связующей жидкости в момент отрыва от поверхности дискового распылителя

Проанализировав литературные источники по исследованию нанесения жидких компонентов и выбрав в качестве рабочего органа ввода химических компонентов дисковый распылитель, смоделируем процесс распыла жидкости с его поверхности.

Предположим, что точка отрыва капли характеризуется координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  (см. рис. 2.11), ордината и абсцисса точки отрыва удовлетворяют уравнению окружности с центром, совпадающим с центром дискового распылителя, и радиусом  $r_{\text{рас}}$ :

$$x_0^2 + y_0^2 = r_{\text{рас}}^2. \quad (2.114)$$

В момент отрыва на каплю действует сила тяжести  $\vec{G} = m_k \cdot g$ . Поскольку диаметр капель, образующихся на кромке распылителя при мелкодисперсном распылении, мал, то силой сопротивления  $\vec{F}_c$  в условиях закрытого пространства (камеры смешивания дражиратора) можно пренебречь. Тогда закон движения ее после отрыва от кромки диска будет иметь следующий вид:

$$m_k \cdot \vec{a}_k = \vec{F}_{\text{рез}}, \quad (2.115)$$

где  $m_k$  – масса капли, кг;

$\vec{a}_k$  – ускорение капли, м/с<sup>2</sup>;

$\vec{F}_{\text{рез}}$  – результирующая сила, Н.

Если представить этот закон в проекциях на оси координат, то получим:

$$\begin{aligned} m_k \cdot x_k &= 0; \\ m_k \cdot y_k &= 0; \\ m_k \cdot z_k &= m_k \cdot g, \end{aligned} \quad (2.116)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  – проекции ускорений на соответствующие оси координат, м/с<sup>2</sup>.

Сократим в уравнениях системы  $m_k$  и дважды проинтегрируем их по времени движения капли.

Тогда общее решение первого дифференциального уравнения системы будет иметь вид:

$$x_k = C_5 \cdot t + C_6, \quad (2.117)$$

где  $C_5, C_6$  – произвольные постоянные.

Зависимость (2.117) в общем виде описывает перемещение капли

вдоль оси  $Ox$ . Для того чтобы определить  $C_5$ ,  $C_6$ , воспользуемся начальными условиями:  $x(0) = x_0$ ;  $V_x(0) = \left| \overline{V}_x^0 \right|$ . Так как  $x_k \in C_5$ , а  $x_k(0) = \left| \overline{V}_x^0 \right| \cdot 0 + C_6$ , то  $C_6 = V_x^0$ . Тогда зависимость (2.117) примет следующий вид:  $x_k = \left| \overline{V}_x^0 \right| \cdot t + C_6$ . Так как  $x_k(0) = x_0$ , то  $x_0 = \left| \overline{V}_x^0 \right| \cdot 0 + C_6$ , а значит,  $C_6 = x_0$ . Таким образом, перемещение капли вдоль оси  $Ox$  для рассматриваемого случая описывается соотношением

$$x_k = \left| \overline{V}_x^0 \right| t + x_0. \quad (2.118)$$

Поступая аналогичным образом, можно записать, что изменение вектора перемещения вдоль оси  $Oy$  подчиняется зависимости

$$y_k = \left| \overline{V}_y^0 \right| t + y_0. \quad (2.119)$$

Уравнение движение капли вдоль оси  $Oz$  имеет следующий вид:

$$z_k = g \cdot t^2 + C_7. \quad (2.120)$$

Дважды проинтегрировав данное уравнение, получим:

$$z_k = \frac{g}{2} t^2 + C_7 t + C_8. \quad (2.121)$$

При  $z(0) = z_0$  и  $\dot{z}_k(0) = \left| \overline{V}_z^0 \right|$  получим  $\left| \overline{V}_z^0 \right| = -g \cdot 0 + C_7$ , откуда  $C_7 = \left| \overline{V}_z^0 \right|$ .

Тогда  $z_k(0) = z_0 = \frac{g}{2} \cdot 0^2 + \left| \overline{V}_z^0 \right| \cdot 0 + C_8$ , откуда  $C_8 = z_0$ . Таким образом, перемещение капли вдоль оси  $Oz$  будет определяться зависимостью

$$z_k = \frac{g}{2} t^2 + \left| \overline{V}_z^0 \right| t + z_0. \quad (2.122)$$

Анализ зависимостей (1.1), (1.3), (1.9) показывает, что при вращении дискового распылителя с угловой скоростью  $\omega_{\text{рас}} = 314$  рад/с, расходом жидкости (воды)  $Q_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, кинематической вязкостью ее  $\nu_{\text{ж}} = 1,004 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, плотностью  $\rho_{\text{ж}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{ж}} = 72,86 \cdot 10^{-3}$  Н/м минимальный радиус распылителя  $r_{\text{мин}}$  составляет 0,056 м.

Выбор распылителя с радиусом  $r_{\text{рас}} = 0,1$  м удовлетворяет условию образования мелкодисперсного капельного потока с максимальным диаметром капель  $d_k = 0,000326$  м. Отрываясь от кромок распылителя,

капли воды обладают следующими проекциями скорости:  $V_x^0 = 1,4$  м/с,  $V_y^0 = 31,25$  м/с,  $V_z^0 = 0,000159$  м/с (прил. А7).

Зависимости (2.118), (2.119), (2.122) определяют траекторию движения капли в зависимости от времени полета при отрыве ее от поверхности дискового распылителя. Они позволяют связать режимы работы дискового распылителя с конструктивными параметрами элементов камеры смешивания и технологическими параметрами процесса дражирования.

Анализ движения капли воды в плоскости  $xOz$ , при заданных параметрах распылителя (рис. 2.12) [114], позволил сделать вывод о том, что дальность полета капли ( $l_k$ , м) от поверхности дискового распылителя, установленного на высоте ( $H_{\text{рас}}$ , м) от основания дна, составит более 6 м, причем в пределах 1 м траектория капли существенно не меняется, т. е. капельный поток в этих пределах будет двигаться горизонтально и обладать большой проникающей способностью.

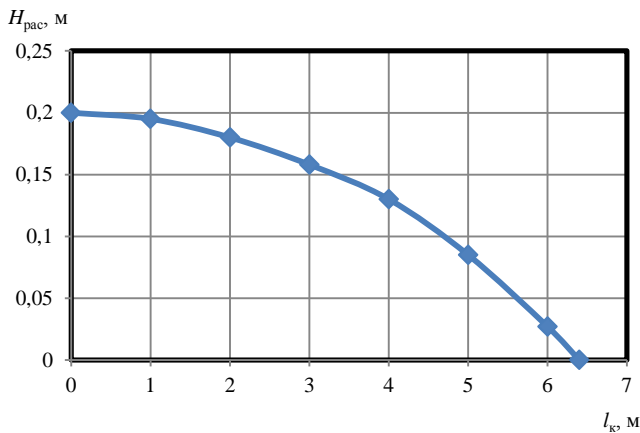


Рис. 2.12. Зависимость дальности полета капли  $l_k$  от высоты  $H_{\text{рас}}$  установки дискового распылителя

Волнообразная кромка дискового распылителя позволяет получить круговой капельный поток высотой  $h_B$  (см. рис. 2.11), что увеличивает площадь обрабатываемой поверхности семян.



Если представить результирующую силу, действующую на семена, следующим образом:

$$\vec{F}_{\text{рез1}} = m_c \vec{a}_c, \quad (2.127)$$

где  $m_c$  – масса семени, кг;

$\vec{a}_c$  – ускорение семени,  $\text{м/с}^2$ ,

тогда неравенство (2.125) примет следующий вид:

$$2 \pi \sigma_{\text{ж}} r_c m_c |\vec{a}_c|. \quad (2.128)$$

Если представить семя в форме шара, тогда его массу можно выразить как

$$m_c = \frac{4}{3} r_c^3 \rho_c, \quad (2.129)$$

где  $\rho_c$  – плотность семени,  $\text{кг/м}^3$ .

Подставив в неравенство выраженные значения (2.128), получим следующее неравенство:

$$2 \pi \sigma_{\text{ж}} r_c \frac{4}{3} r_c^3 \rho_c |\vec{a}_c|. \quad (2.130)$$

Проведя математические преобразования, получим условие отделения семян друг от друга при обработке их связующей жидкостью:

$$\frac{3 \sigma_{\text{ж}}}{2 r_c^2 \rho_c} |\vec{a}_c|. \quad (2.131)$$

Таким образом, зная вязкость связующей жидкости, радиус обрабатываемых семян и их плотность, можно определить предельное ускорение семян, при котором они будут отделяться друг от друга.

Для того чтобы частички порошка прилипали к поверхности семян, должно выполняться неравенство (2.126).

Если представить результирующую силу, действующую на частицу порошка, как

$$\vec{F}_{\text{рез2}} = m_{\text{п}} \vec{a}_{\text{п}}, \quad (2.132)$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса частицы порошка, кг;

$\vec{a}_{\text{п}}$  – ускорение частицы порошка,  $\text{м/с}^2$ ,

тогда неравенство (2.126) примет следующий вид:

$$m_{\text{п}} |\vec{a}_{\text{п}}| < 4 \pi \sigma_{\text{ж}} r_{\text{п}}. \quad (2.133)$$

Если представить частичку порошка в форме шара, тогда его массу можно выразить как

$$m_n = \frac{4}{3} r_n^3 \rho_n, \quad (2.134)$$

где  $\rho_n$  – плотность частицы порошка, кг/м<sup>3</sup>.

Подставив в неравенство (2.133)  $m_n$ , получим:

$$\frac{4}{3} \pi r_n^3 \rho_n |\vec{a}_n| < 4 \pi \sigma_{ж} r_n \quad (2.135)$$

Проведя математические преобразования, получим:

$$|\vec{a}_n| < \frac{3}{r_n^2} \sigma_{ж}. \quad (2.136)$$

Анализируя неравенство (2.136), можно сделать вывод о том, что чем меньше радиус частицы порошка и ее плотность, тем выше сила адгезии связующей жидкости. Аналогичные утверждения можно проследить и в источниках [39, 40].

Для получения семенного драже необходимо, чтобы семена не слипались, но при этом частички порошка прилипали к их поверхности. Это условие учитывают неравенства (2.131) и (2.136). Для обеспечения их необходимо с учетом выбора соответствующей связующей жидкости и сухого порошка подобрать оптимальный режим движения семян в камере смешивания. Ввиду сложности теоретического расчета степени гидрофильности поверхности семян необходимо провести экспериментальные исследования по факту определения оптимального количества связующей жидкости, приходящейся на определенную порцию семян, и проследить взаимодействие смоченных семян с сухим порошком при установившемся режиме их движения.

## Выводы

1. Эффективность процесса дражирования семян сахарной свеклы в камере смешивания с вращающимся коническим дном и лопастным отражателем определяется конструктивными и технологическими параметрами:

- дна: его конусностью (рад), радиусом нижнего основания  $r_{дн}$  (м), высотой  $H_{дн}$  (м), угловой скоростью вращения (рад/с);
- неподвижного цилиндрического корпуса – его радиусом  $R_{дн}$  (м);
- лопастного отражателя: его высотой установки  $H_{от}$  (м), углом наклона лопастей (рад), их длиной  $l_{отр}$  (м) и высотой  $h_{отр}$  (м), а также их количеством  $k_{от}$  (шт.).

2. Получены аналитические зависимости для определения кинематических параметров движения семян в камере смешивания и разработаны методики их реализации:

- по вращающемуся дну (модель (2.59), реализация – раздел 2.4);
- по неподвижному цилиндрическому корпусу (модель (2.81), реализация – раздел 2.6);
- по лопасти отражателя – зависимости (2.97), (2.98), (2.101).

3. Обоснованы границы варьирования следующих параметров процесса дражирования:

- угловой скорости вращения дна – не менее 10 рад/с;
- конусности дна – не менее  $40^\circ$  (0,7 рад);
- угла наклона лопасти –  $35^\circ$  (0,61 рад);
- высоты установки лопастного отражателя  $H_{от}$  – до предельной высоты поднятия семени  $H_{п}$ , которая определяется на основании данных раздела 2.6.

4. Получены аналитические зависимости (2.118), (2.119), (2.122), позволяющие определить траекторию движение капель связующей жидкости при отрыве их от поверхности дискового распылителя.

5. Аналитически установлено условие разделения семян, смоченных связующей жидкостью, – (2.131) и условие прилипания частиц сухого порошка к смоченной поверхности обрабатываемых семян – (2.136).

### 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Программа исследований

Проведенные теоретические исследования и обзор литературных источников, посвященных процессу дражирования семян, позволяют сделать вывод о том, что качественные показатели получаемого семенного драже и энергоемкость процесса дражирования зависят от свойств семян и химических компонентов, наносимых на их поверхность; конструктивных параметров и режимов работы установки для дражирования.

В ходе анализа процесса дражирования семян был поставлен ряд задач, требующих дополнительных экспериментальных исследований.

В связи с этим программа лабораторных исследований включала:

- изучение физико-механических свойств семян сахарной свеклы;
- изучение свойств химических компонентов, наносимых на семена;
- определение оптимального соотношения связующей жидкости с семенами и сухим порошком;
- определение количества циклов обработки семян;
- определение оптимальных конструктивных параметров камеры смешивания;
- обоснование угловой скорости вращения дна камеры смешивания;
- обоснование коэффициента загрузки камеры смешивания;
- обоснование времени обработки семян;
- исследование качества оболочки семенного драже.

В дальнейшем были проведены производственные испытания для подтверждения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Производственные испытания включали:

- проведение в производственных условиях исследований работы дражиратора с обоснованными в результате регрессионного анализа конструктивными параметрами и режимами работы;
- определение рациональных технологических параметров процесса дражирования семян, обеспечивающих требуемый уровень качественных показателей получаемого семенного драже;
- определение экономической эффективности применения центробежного дражиратора с лопастным отражателем.

### 3.2. Методики изучения физико-механических свойств семян сахарной свеклы

Физико-механические свойства семян сахарной свеклы являются важными исходными данными для проектирования рабочих органов машин и определения их геометрических и кинематических параметров, так как любой технологический процесс, осуществляемый сельскохозяйственной машиной, должен соответствовать свойствам и состоянию обрабатываемого материала.

Большое влияние на индивидуальные свойства семенного материала оказывают вид и сорт растения, условия его произрастания, уборки и хранения. С другой стороны, в ходе уборки урожая семенная партия состоит из огромного количества отдельных семян, каждое из которых имеет индивидуальную форму, размеры и физико-механические свойства. Таким образом, характеристика этой семенной партии складывается из характеристики отдельных семян и для получения правильной оценки всей партии необходимо выяснить степень неоднородности партии, установить пределы колебаний и средние величины их значений.

Для изучения индивидуальных свойств семени, как и любого другого материала, применяют методы вариационной статистики [17, 22].

Данные методы подразумевают построение вариационного ряда, нахождение средней величины вариационного ряда ( $M$ ), среднего квадратического отклонения ( $\sigma$ ), коэффициента вариации ( $V_{\text{вар}}$ ).

Вариационный ряд показывает размах колебаний исследуемого признака материала и количество материала с данным признаком.

Средняя величина вариационного ряда (математическое ожидание) характеризует среднее значение исследуемого признака в пробе материала:

$$M = \frac{\sum_j n_j X_j}{N_n}, \quad (3.1)$$

где  $X_j$  – варианты пробы;

$n_j$  – частота варианты;

$N_n$  – объем пробы.

Среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации характеризуют изменчивость данного признака.

Среднее квадратическое отклонение характеризует среднее отклонение исследуемого признака от средней величины вариационного ряда:

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n n_j (M - X_j)^2}{N_n - 1}}. \quad (3.2)$$

Величина находится в определенном соотношении с длиной вариационного ряда. Для теоретической биномиальной кривой можно рассчитать, количество всех вариантов, отстоящих от средней величины вариационного ряда. Так, на расстоянии 2,0 от М в теоретическом вариационном ряду находится 95,5 % всех вариантов.

Коэффициент вариации характеризует процентное соотношение среднего квадратического отклонения к средней величине вариационного ряда:

$$V_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{M} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

При сопоставлении величины коэффициентов вариации двух или нескольких вариационных рядов можно судить о степени их изменчивости по тому или иному признаку.

В исследовании физико-механических свойств семенного материала очень важно получение достоверных результатов. Для этого необходимо правильно отобрать образцы, предназначенные для изучения, и определить необходимый объем пробы.

Для получения достоверных результатов исследований необходимый объем пробы определяется по зависимости [17, 22]:

$$n_n = \frac{t^2 \sigma^2}{\zeta^2}, \quad (3.4)$$

где  $n_n$  – объем пробы, шт.;

$t$  критерий Стьюдента;

$\sigma$  среднее квадратическое отклонение, %;

$\zeta$  возможная ошибка средней величины, %.

Значение критерия Стьюдента зависит от избранного уровня значимости. В расчетах принимается  $t = 2,447$  и  $\zeta = 0,5$ .

Значение относительной величины предельной ошибки при исследовании сельскохозяйственных процессов рекомендуется выбирать в пределах 3...5 % [53]. Каждый опыт производится в трехкратной повторности. В этом случае вероятность охвата генеральной средней в исчисленных пределах равна 0,95.

### 3.2.1. Методики определения коэффициентов трения семян

При проведении экспериментальных исследований необходимо было определить коэффициенты внутреннего и внешнего статического трения. Это важно, так как энергетические и качественные показатели многих средств механизации в значительной степени зависят от характеристик материала по трению.

Коэффициент внутреннего трения семян определяли с помощью специального прибора (рис. 3.1). Для определения коэффициента внутреннего трения диск 2 опускали на дно цилиндра 1 и затем насыпали на него семена. После этого диск поднимали по вертикали до выхода из цилиндра. Часть семян в процессе подъема ссыпалась обратно в цилиндр, а оставшиеся на диске семена образовывали форму конуса. Высоту конуса  $h_k$  определяли по шкале, нанесенной на центральном стержне 3.

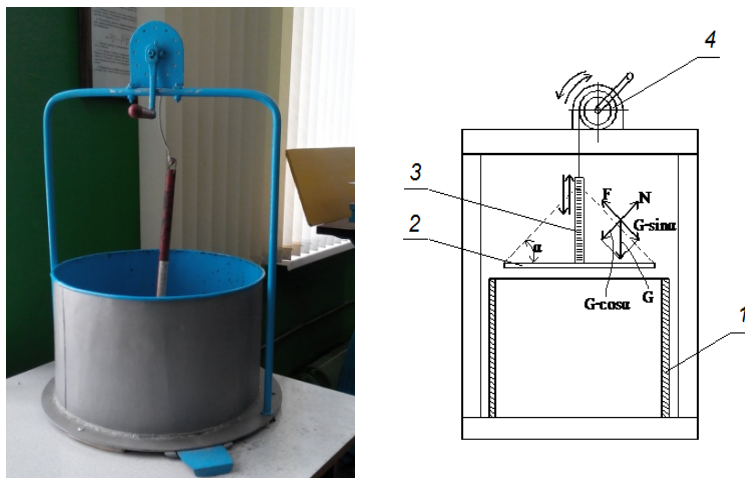


Рис. 3.1. Общий вид и схема прибора для определения коэффициента внутреннего трения:

- 1 цилиндр; 2 диск; 3 центральный стержень;
- 4 подъемное устройство

Коэффициент внутреннего трения  $f_v$  определялся по следующей зависимости:

$$f_v = \operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{h_k}{r_d}, \quad (3.5)$$

где  $\varphi_0$  – угол внутреннего трения материала, град;

$h_k$  – высота конуса, м;

$r_d$  – радиус диска, м.

Коэффициент внешнего статического трения определялся с помощью прибора, представленного на рис. 3.2.

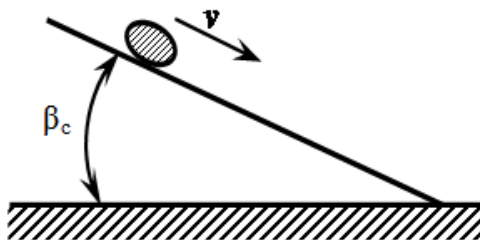


Рис. 3.2. Общий вид и схема прибора для определения коэффициента статического трения

Прибор состоит из металлической пластины, которая из горизонтального положения может поворачиваться на угол до  $60^\circ$ . Для определения статического трения на пластину высыпались семена, затем

пластина постепенно поворачивалась до тех пор, пока семена не начнут движение.

Коэффициент статического трения равен тангенсу угла подъема пластины  $\beta_c$ .

Коэффициент внешнего динамического трения принимался на основании априорной информации [26, 94, 112].

### 3.2.2. Определение влажности и размерно-массовых характеристик семян

Влажность и размерно-массовые характеристики семян определяли в аккредитованной лаборатории качества семян УО БГСХА.

Влажность семян измеряли электронным влагомером Pfeuffer-hi lite (рис. 3.3). Семена помещали в измерительную камеру влагомера и проводили измерения.



Рис. 3.3. Общий вид электронного влагомера Pfeuffer-hi lite

По заданному размеру семена сахарной свеклы отбирали с помощью вибрационного решетного классификатора РКФ-1 и сменных решет (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Общий вид вибрационного решетного классификатора РКФ-1

Абсолютная масса семян зависит от особенностей сорта и условий, в которых он возделывался. Для сахарной свеклы принято, согласно ГОСТ 22617.4, определять массу 1000 семян. Массу семян определяли с помощью электронных весов OHAUS Adventurer (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Общий вид электронных весов OHAUS Adventurer

Под объемной массой семян понимают массу 1 л семян, выраженную в граммах. Объемную массу семян определяли с помощью литровой пурки, состоящей из мерки, наполнителя, цилиндра с воронкой, ножа и весов (рис. 3.6).

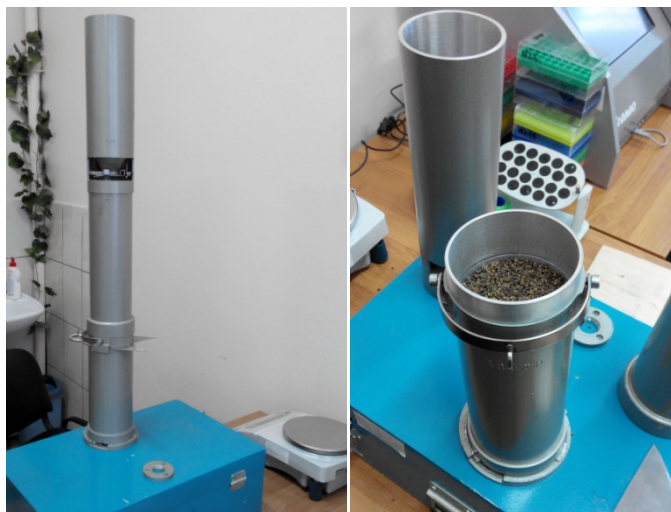


Рис. 3.6. Общий вид пурки литровой ПХ-1

Замеры объемной массы семян с помощью литровой пурки производили по стандартной методике [87].

Эквивалентный диаметр семени ( $d_s$ ) определяется как диаметр шара с объемом, равным объему среднего семени в навеске [21].

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6 V_{\text{цн}}}{n_{\text{сем}}}}, \quad (3.6)$$

где  $V_{\text{цн}}$  – объем семян в мерном цилиндре с индифферентной жидкостью, мм<sup>3</sup>;

$n_{\text{сем}}$  – число семян в навеске, шт.

Эквивалентный диаметр семени определялся [21] на приборе, который представляет собой мерный цилиндр со шкалой деления, заполненный до определенного уровня индифферентной жидкостью, такой, чтобы ее плотность была меньше плотности семян (гексаном) (рис. 3.7).

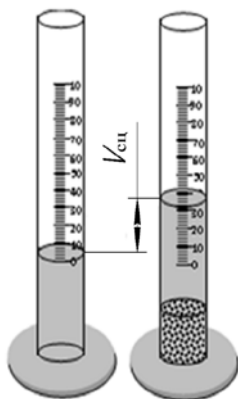


Рис. 3.7. Схема и общий вид мерного цилиндра для определения эквивалентного диаметра семени

Через бюретку в мерный цилиндр засыпали семена, после чего их перемешивали для удаления пузырьков воздуха с поверхности семян. Разность между уровнем жидкости до засыпки навески семян и жидкости вместе с семенами равнялась суммарному объему в ней всех семян. Зная число семян, засыпанных в мерный цилиндр, по формуле (3.3) определялся эквивалентный диаметр семени.

### 3.2.3. Определение коэффициента восстановления семян

Для моделирования движения семян через лопастью отражатель ставилась задача, состоящая в определении коэффициента восстановления семян. Коэффициент восстановления семян определялся с помощью изготовленной лабораторной установки (рис. 3.8) по зависимости [104]:

$$k = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (3.7)$$

где  $H_1$  – высота начала падения семени, м;

$H_2$  – высота отскока семени от пластины, м.

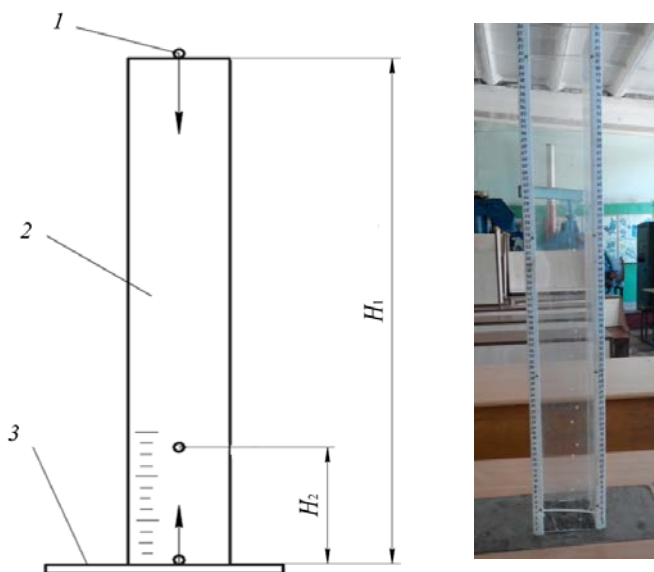


Рис. 3.8. Схема и общий вид лабораторной установки для определения коэффициента восстановления семя: 1 семя; 2 прозрачный корпус со шкалой; 3 металлическая пластина

С высоты  $H_1$  через прозрачный корпус с размеченной линейкой на горизонтально расположенную металлическую пластину сбрасывали семена сахарной свеклы без начальной скорости. С помощью высокоскоростной камеры Sony CyberShot DSC-HX300 снимали процесс падения и отскока семя от пластины. После разложения видео на кадры определяли наивысшую высоту  $H_2$  отскока семя от пластины. Опыты проводили на сухих семенах, на увлажненных и на семенах с оболочкой.

### 3.3. Изучение свойств компонентов, наносимых на семя

Для дражирования семя сахарной свеклы была использована бленда (сухой порошок) немецкой фирмы GTG. В качестве связующей жидкости была выбрана вода (рекомендации производителя бленды).

При изучении свойств бленды определялись ее насыпная плотность и размер частиц, которые влияют на процесс формирования оболочки.

Насыпную плотность определяли по стандартной методике [87].

Размер частиц порошка бленды определялся с помощью набора сит (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Общий вид сит для определения дисперсности бленды

Изучение свойств воды не проводилось, ее параметры выбирались на основании априорной информации [76, 111].

### **3.4. Методика определения оптимального соотношения компонентов процесса дражирования**

Перед началом экспериментальных исследований необходимо было определить нужное количество связующей жидкости (воды) на заданную порцию семян для создания на их поверхности тонкой пленки, обладающей адгезионной способностью удерживать частички бленды, но препятствующей слипанию семян.

Определенная порция семян, подаваемая в камеру смешивания для дражирования, выражалась через коэффициент загрузки камеры смешивания

$$\frac{V_{\text{сем}}}{V_{\text{дн}}}, \quad (3.8)$$

где  $V_{\text{сем}}$  – объем семян, подаваемых в камеру смешивания,  $\text{м}^3$ .

Необходимое количество связующей жидкости для заданной порции семян определялось через коэффициент предельного увлажнения ( $\xi$ ), который можно определить как

$$\xi = \frac{V_{\text{жс}}}{V_{\text{сем}}}, \quad (3.9)$$

где  $V_{\text{жс}}$  – объем жидкости, при котором семена начинают слипаться,  $\text{м}^3$ .

Эксперимент проводили следующим образом: отмеренная порция семян помещалась в камеру смешивания дражиратора. На различных режимах движения вращающегося дна на семена через распылитель наносилась вода до тех пор, пока семена не начинали слипаться между собой и прилипать к стенкам камеры смешивания. Данное значение количества воды фиксировалось.

После того как было определено необходимое количество воды, определялось необходимое количество бленды. После подачи воды на семена подавалась бленда до тех пор, пока вся поверхность семян не покрывалась частичками порошка и он уже не прилипал к семенам, а двигался в общем потоке с семенами. Данный параметр фиксировался на предельном значении. После проведения одного цикла обработки (подачи жидкого и сухого компонентов) проводили еще несколько циклов до получения семенного драже необходимого размера. При этом также фиксировалось значение расходуемого количества воды и бленды на разных циклах обработки.

### 3.5. Методика определения количества и времени циклов обработки семян

После определения необходимого количества связующей жидкости на определенную порцию семян и оптимального соотношения бленды со связующей жидкостью стояла задача в определении числа циклов обработки семян и их продолжительности для получения семенного драже определенного размера.

Время обработки семян определяли по зависимости

$$t_{\text{об}} = (t_{\text{ж}} + t_{\text{н}}) \cdot n_{\text{ц}}, \quad (3.10)$$

где  $t_{\text{ж}}$  – время ввода связующей жидкости, с;

$t_{\text{н}}$  – время ввода сухих компонентов и их накатывания на поверхность семян, с;

$n_{\text{ц}}$  – количество циклов обработки, шт.

Время ввода связующей жидкости зависит от расхода жидкости  $Q_{\text{ж}}$ , следовательно, зная необходимое количество жидкости для создания одного слоя оболочки, можно определить время ее ввода за один цикл:

$$t_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{жс}}}{Q_{\text{ж}}}. \quad (3.11)$$

Для варьирования времени обработки в экспериментальных исследованиях определяли число циклов обработки (подачи жидких и сухих компонентов на поверхность семян).

Число циклов определяли из расчета общего количества бленды, необходимого для создания оболочки определенного размера, и количества бленды, вносимого за один цикл:

$$n_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{б}}}{V_{\text{с}}}, \quad (3.12)$$

где  $V_{\text{б}}$  – объем бленды для создания оболочки семенного драже,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{с}}$  – объем бленды на один слой оболочки,  $\text{м}^3$ .

Объем бленды, необходимый для создания семенного драже определенного размера, определялся по зависимости

$$V_{\text{б}} = V_{\text{сем}} (k_{\text{об}} + 1) k_{\text{с}}, \quad (3.13)$$

где  $k_{\text{об}}$  – коэффициент изменения объема дражированных семян;

$k_{\text{с}}$  – коэффициент изменения объема бленды.

Коэффициент изменения объема дражированных семян ( $k_{\text{об}}$ ) представляет собой отношение эквивалентного объема получаемого семенного драже к эквивалентному объему семени:

$$k_{\text{об}} = \frac{V_{\text{дэ}}}{V_{\text{сэ}}}, \quad (3.14)$$

где  $V_{\text{дэ}}$  – эквивалентный объем семенного драже,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{сэ}}$  – эквивалентный объем семени,  $\text{м}^3$ .

Коэффициент изменения объема бленды ( $k_{\text{с}}$ ) представляет собой отношение объема сухой бленды к объему получаемой оболочки на семенах. Данный параметр определялся экспериментально из условий протеканий процесса дражирования.

После определения количества циклов обработки семян, изменяя общее время обработки, определяли время одного цикла:

$$t_{\text{ц}} = (t_{\text{ж}} + t_{\text{н}}) \frac{t_{\text{об}}}{n_{\text{ц}}}. \quad (3.15)$$

Время подачи бленды и ее накатывания на поверхность семян определяли как

$$t_{\text{н}} = \frac{t_{\text{об}}}{n_{\text{ц}}} + t_{\text{ж}}. \quad (3.16)$$

Таким образом, при изменении времени обработки семян для определенной их порции при заданном коэффициенте изменения объема изменялось только время накатывания сухих компонентов на их поверхность.

### **3.6. Методика контроля качества дражированных семян сахарной свеклы**

Согласно ГОСТ 10882–98, дражированные семена сахарной свеклы должны иметь всхожесть не менее 90 %, однородность не менее 95 %, выравненность не менее 94 %, чистоту не менее 99 %, влажность просушенных семян не более 10 %.

К отходу промышленных дражированных семян относят семена, прошедшие через сито с диаметром отверстий 3 мм, семена с поврежденной оболочкой (составляющие половину или менее своего первоначального размера), дражировочный и другой посторонний материал, драже без семени.

Для определения содержания драже с поврежденной оболочкой и дробленых драже на основании требований ГОСТ Р 50260–92 просматривали две пробы по 100 драже; наличие семян в драже определяли путем раздавливания двух проб по 50 драже. Дражированные семена должны соответствовать основной фракции 3,5...4,5 мм. Выравненность по размерам определялась согласно ГОСТ 22617.1–77. Отбор проб для контроля качества семян производился согласно ГОСТ 22617.0–77.

Однородность дражированных семян соответствовала партии подготовленных к дражированию (отшлифованных и откалиброванных) семян по ГОСТ 10882–98.

Кроме параметров, указанных в ГОСТ 10882–98, важным критерием оценки качества дражированных семян является прочность и гигроскопичность их оболочки [44]. Прочность оболочки должна быть достаточной, чтобы выдержать транспортировку, хранение и механизированный высев семян. На основании априорной информации [44] оболочка должна выдерживать усилие в пределах 20...30 Н. Контроль прочности осуществлялся с помощью установки (рис. 3.10) при влажности обработанных семян, не превышающей 10 %.



Рис. 3.10. Общий вид установки для определения прочности оболочки:  
1 семя; 2 металлические пластины

Два семенных драже размещались на металлическом диске на одной линии, проходящей через центр диска, и на одинаковом расстоянии от центра. Сверху на них укладывались металлические диски определенной массы. Увеличение числа дисков происходило до момента начала разрушения оболочки семени.

Величина предельного усилия определялась по следующей формуле:

$$F_n = \frac{m_{\text{гр}} g}{2}, \quad (3.17)$$

где  $m_{\text{гр}}$  – масса груза, действующая на семена, кг;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Гигроскопичность оболочки способствует впитыванию влаги из почвы, быстрому ее разрушению и зависит от композиционного состава оболочки.

Поскольку для дражирования применялась стандартная бленда, изготовленная мировым лидером в ее производстве немецкой фирмой GTG, то на стадии экспериментальных исследований данный параметр не определялся.

### 3.7. Методика экспериментальных исследований

В начале экспериментальных исследований проводили однофакторные поисковые эксперименты для определения оптимальных интервалов варьирования значений основных факторов, а также степени

их влияния на протекание технологического процесса, после чего решали экстремальную задачу.

В процессе решения экстремальной задачи предусматривался ряд последовательных этапов. Вначале проводили отсеивающие эксперименты для получения представления о степени влияния отдельных факторов на параметр оптимизации. При этом для сокращения объема дальнейших исследований малозначащие факторы исключали. На следующем этапе вели поиск области оптимума. После получения математической модели процесса проводили ее анализ на экстремум с целью отыскания оптимального сочетания факторов в исследуемом объеме [53, 60].

### **3.7.1. Выбор и обоснование интервалов варьирования основных факторов**

При выборе и обосновании интервалов варьирования факторов в большинстве случаев используются априорная информация и теоретические исследования с определенными ограничениями, налагаемыми на изучаемый процесс. Такими ограничениями могут являться: работоспособность конструкции, возможность конструктивного исполнения, стабильность протекания процесса и т. д.

Имеют место условия, при которых область факторного пространства задается строго, в этом случае границы фактора считаются определенными. Возможен случай, когда известно нижнее или верхнее значение границ фактора. Тогда область изменения фактора определяется в ходе эксперимента в направлении возрастания или убывания значений фактора. В каждом из перечисленных случаев область варьирования факторов должна быть подтверждена и уточнена для конкретных условий и параметров работы установки в ходе поискового эксперимента.

Процесс нанесения искусственных оболочек в камере смешивания дражжироватора зависит от многих параметров. Вследствие этого экспериментальные исследования проводились путем планирования многофакторного эксперимента. Обобщающим критерием оценки работы дражжироватора при планировании многофакторного эксперимента (параметром оптимизации) являлась доля качественных семян в пробе ( $D_{кс}$ ) – отношение количества дражжированных семян сахарной свеклы с размером 3,5...4,5 мм, соответствующих требованиям ГОСТ 10882–98,

к общему количеству обработанных семян.

На основании теоретических исследований и априорной информации [62, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 124] были выбраны следующие факторы, влияющие на качество получаемого семенного драже:  $\omega$  – угловая скорость вращения дна, рад/с;  $D_k$  – диаметр камеры смешивания, м;  $\alpha$  – конусность дна, рад;  $\nu$  – коэффициент загрузки камеры смешивания, % от объема конического дна;  $t_{об}$  – время обработки семян, с;  $H_{рас}$  – высота установки распылителя над основанием дна камеры смешивания, м;  $\omega_{рас}$  – угловая скорость вращения распылителя, рад/с;  $r_{рас}$  – радиус распылителя, м;  $H_{от}$  – высота расположения лопастного отражателя над верхней кромкой дна, м;  $\kappa_{от}$  – количество лопастей отражателя, шт.;  $Q_{ж}$  – расход жидкости связующего раствора (воды), м<sup>3</sup>/с;  $h_{отр}$  – высота лопасти отражателя, м;  $\beta$  – угол наклона лопасти отражателя, град;  $l_{отр}$  – длина лопасти отражателя, м.

С целью уменьшения числа факторов, влияющих на параметр оптимизации, устранения незначимых факторов и определения границ варьирования каждого из факторов перед проведением экспериментальных исследований выполнялся анализ теоретических исследований и априорной информации.

Угловая скорость вращения дна камеры смешивания ( $\omega$ , рад/с) является одним из основных параметров, влияющих на изучаемый процесс. Ее нижняя граница задавалась таким образом, чтобы обеспечить подъем семян по конической поверхности дна дражироватора и придать им достаточную кинетическую энергию для прохождения лопастного отражателя и создания «завесы» из семян. Нижняя граница выбиралась на основании теоретических исследований [118] и составила 10 рад/с, верхняя граница устанавливалась в ходе проведения эксперимента по параметру оптимизации.

Диаметр камеры смешивания ( $D_k$ , м) являлся фиксированным параметром – 0,515 м и задавался с учетом предполагаемой производительности, соответствующей данному типу оборудования. За один цикл обработки предполагалось обрабатывать не менее одной посевной единицы семян сахарной свеклы.

Конусность дна камеры смешивания ( $\alpha$ , рад) задавалась на основе теоретических исследований и рекомендаций [118]: нижняя граница составила 40° (0,7 рад), а верхняя определялась опытным путем на стадии поискового эксперимента.

Нижняя граница времени обработки семян ( $t_{об}$ , с) задавалась с учетом технологических возможностей создания оболочки определенного размера в дражираторе предлагаемой конструкции. Для фракции дражированных семян сахарной свеклы диаметр семян составляет от 3,5 до 4,5 мм при толщине оболочки от 0,25 до 0,75 мм. Было выдвинуто предположение (подтвержденное экспериментально) о том, что менее чем за 300 с обработки семенного материала не сформируется полноценная оболочка, поэтому верхняя граница времени обработки устанавливалась в ходе проведения эксперимента по оптимизирующему параметру.

Нижняя граница коэффициента загрузки камеры смешивания ( $v$ ) задавалась с учетом минимальной производительности дражиратора – 0,1 (10 %), верхняя определялась в ходе проведения эксперимента по оптимизирующему параметру.

Угловая скорость вращения распылителя ( $\omega_{рас}$ , рад/с) принималась, исходя из теоретических исследований и конструктивных параметров установки [114] и имела фиксированное значение 314 рад/с. Для привода был выбран стандартный электродвигатель с частотой вращения 3000 об/мин и прямой передачей.

Радиус распылителя ( $r_{рас}$ , м) принимался на основании теоретических исследований [114], был принят равным 0,1 м.

Нижняя граница высоты расположения лопастного отражателя ( $H_{от}$ , м) была зафиксирована на отметке 0 от верхней кромки дна, верхняя определялась в ходе проведения эксперимента по оптимизирующему параметру.

Высота установки распылителя в камере смешивания ( $H_{рас}$ , м) должна обеспечивать попадание капельного потока связующей жидкости на «семенную завесу», поэтому ее принимали фиксированной, зависящей от высоты установки лопастного отражателя и высоты дна [114].

Количество лопастей в отражателе ( $k_{от}$ , шт.) выбиралось на основании экспериментальных исследований. С точки зрения достаточного количества лопастей для создания «семенной завесы» и удобства установки их в камере смешивания верхняя граница принималась 12 шт.

Расход жидкости связующего раствора (воды) ( $Q_{ж}$ , м<sup>3</sup>/с) зависит от угловой скорости вращения дискового распылителя и его диаметра. При выборе распылителя с радиусом диска  $r_{рас} = 0,1$  м и угловой ско-

ростью вращения  $\omega_{\text{рас}} = 314$  рад/с расход жидкости принимали равным  $1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с.

Длину лопасти отражателя ( $l_{\text{отр}}$ , м) определяли опытным путем, постепенно увеличивая ее значение, начиная с 0,01 м. Верхняя граница определялась в ходе проведения эксперимента по оптимизирующему параметру.

На основании теоретических исследований [119] угол наклона лопасти отражателя ( $\beta$ , рад) составлял  $35^\circ$  (0,61 рад).

Высота лопасти отражателя ( $h_{\text{отр}}$ , м) выбиралась достаточной для отражения определенной массы семян и определялась опытным путем, начиная с нижней границы, равной 0,01 м. Верхняя граница определялась в ходе проведения эксперимента по оптимизирующему параметру.

### **3.7.2. Методика проведения лабораторных исследований процесса дражирования**

Целью лабораторных исследований была проверка теоретических зависимостей динамики движения семян в камере смешивания дражиратора, уточнение интервалов варьирования факторов, влияющих на процесс дражирования, определение качественных показателей полученного семенного драже.

Для проведения лабораторных исследований в УО БГСХА совместно с сотрудниками ООО НПП «Белама плюс» (г. Орша) была разработана и изготовлена экспериментальная установка, предназначенная для нанесения питательно-защитных компонентов на поверхность семян (рис. 3.11).

Камера смешивания дражиратора является основной конструктивной частью, в которой происходит процесс нанесения питательной оболочки на поверхность семян (рис. 3.12, 3.13).



Рис. 3.11. Общий вид экспериментальной установки:  
 1 – резервуар жидких компонентов; 2 – бункер-дозатор сухих компонентов с отдельной камерой для семян; 3 – камера смешивания дражировщика; 4 – частотный преобразователь; 5 – рама; 6 – выгрузный бункер; 7 – мешок с обработанными семенами



Рис. 3.12. Общий вид камеры смешивания: 1 – трубопровод подачи жидких компонентов; 2 – лопастной отражатель; 3 – дисковый распылитель; 4 – трубопровод подачи сухих компонентов; 5 – семенное драже; 6 – дно дражировщика



Рис. 3.13. Движение семян в камере смешивания

Конструкция лабораторной установки позволяет в необходимых пределах изменять следующие параметры: угловую скорость вращения дна камеры смешивания; угол наклона дна; коэффициент загрузки камеры смешивания; количество лопастей отражателя; время обработки семян; высоту расположения лопастного отражателя; длину лопастей отражателя; высоту лопастей отражателя.

Принцип работы лабораторной установки соответствует описанию к схеме центробежного дражирователя семян с лопастным отражателем, представленной в первой главе на рис. 1.20.

Лабораторные исследования проводились по восьми факторам, области изменения которых были определены, исходя из предыдущих рассуждений. По мере исследования каждого фактора дальнейшие эксперименты проводились при фиксированном значении фактора на уровне, соответствующем наилучшему значению параметра оптимизации.

Опыты выполнялись по нижеприведенной методике.

Порция подготовленных семян объемом от 0,001 до 0,006 м<sup>3</sup> засыпалась в бункер лабораторной установки. После открытия регулировочных заслонок бункера семена направлялись на вращающееся дно дражирователя. Под действием вращающегося дна семена создавали «завесу» в камере смешивания. На образовавшуюся «семенную завесу» дисковым распылителем распылялся жидкий связующий компонент (вода). После увлажнения семян в камеру смешивания подавался сухой питательный порошок (бленда). Для равномерного распределения бленды в камере смешивания она подавалась дозированными порциями на дисковый распылитель. После накатывания сухих компонентов

на поверхность семян и формирования одного слоя оболочки цикла подачи воды и бленды проводились еще несколько раз до создания оболочки необходимого размера, затем открывалась выгрузная заслонка и готовое семенное драже высыпалось в выгрузной бункер.

Для проведения лабораторных исследований по определению влияния основных факторов на параметр оптимизации необходимо было обеспечить возможность их варьирования в пределах предполагаемых интервалов.

Угловую скорость вращения дна дражиратора изменяли путем использования частотного преобразователя VFD015EL43A (рис. 3.14), который позволял изменять и фиксировать значения угловой скорости вращения дна дражиратора.



Рис. 3.14. Общий вид частотного преобразователя VFD015EL43A

Для изменения конусности дна камеры смешивания использовались сменные донья с различными углами наклона (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Общий вид доньев дражироватора

Количество лопастей в отражателе изменяли путем установки дополнительных лопастей в сам отражатель (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Общий вид лопастей отражателя

Длину и высоту лопастей изменяли путем установки в лопастной отражатель лопастей разной геометрии.

Высоту расположения лопастного отражателя изменяли путем перемещения его вдоль камеры смешивания, начиная от верхней кромки подвижного дна.

Коэффициент загрузки изменяли путем подачи разных порций семян, используя стандартные мерные емкости.

Время опыта измеряли секундомером.

## Выводы

1. Представленная программа и методика экспериментальных исследований раскрывает последовательно все этапы работы и методы проведенных исследований.

2. На основании априорной информации и теоретических исследований определены основные факторы и уровни их варьирования, влияющие на процесс дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с лопастным отражателем:

- угловая скорость вращения дна камеры смешивания – от 10 рад/с;
- конусность дна – от  $40^\circ$  (0,7 рад);
- время обработки семян – от 300 с;
- коэффициент загрузки камеры смешивания – от 0,1 (10 %);
- высота расположения лопастного отражателя – от 0 м;
- количество лопастей отражателя – до 12 шт.;
- длина лопасти отражателя – от 0,01 м;
- высота лопасти отражателя – от 0,01 м.

3. Применяемая лабораторная установка, приборы, измерительный инструмент и методы проведения опытов, измерений и обработки результатов позволяют получить достоверные данные и подтвердить основные теоретические предпосылки, экспериментально обосновать рациональные параметры и режимы работы центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Свойства семян сахарной свеклы и наносимых на их поверхность химических компонентов

Во второй главе была установлена необходимость изучения физико-механических свойств семян сахарной свеклы. Для изучения их применяли методики, рассмотренные в разделе 3.2. В экспериментах использовали отшлифованные, откалиброванные и просушенные семена сахарной свеклы сорта Белполь с чистотой от 99 % и заявленной всхожестью не менее 98 %. В результате проведенных опытов были получены следующие результаты (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Физико-механические свойства семян сахарной свеклы

Показатель	Значение
Эквивалентный диаметр, мм	3,0...3,1
Влажность, %	7...9
Коэффициент внутреннего трения	0,55...0,56
Коэффициент статического трения	0,406...0,415
Динамический коэффициент трения	0,30...0,32
Объемная масса семян, кг/м <sup>3</sup>	407...424
Масса 1000 семян, г	13,2...13,6
Коэффициент восстановления семян:	
сухих	0,42
влажных	0,31
с оболочкой	0,28

Для изучения физико-механических характеристик сухого порошка (бленды) немецкой фирмы GTG применяли методику, рассмотренную в разделе 3.3.

В результате проведенных исследований были определены: объемная масса бленды – 610 кг/м<sup>3</sup>, размер частиц порошка бленды – от 80 до  $125 \cdot 10^{-6}$  м.

В качестве связующей жидкости использовали воду с параметрами: кинематической вязкостью  $\nu_{ж} = 1,004 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, плотностью  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_{ж} = 72,86 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

## 4.2. Результаты исследований взаимодействия связующей жидкости с семенами и сухим порошком

В результате проведенных исследований были получены экспериментальные данные, позволяющие описать зависимость угловой скорости вращения дна дражиратора от коэффициента предельного увлажнения семян водой. Полученные данные были аппроксимированы логарифмической кривой (рис. 4.1).

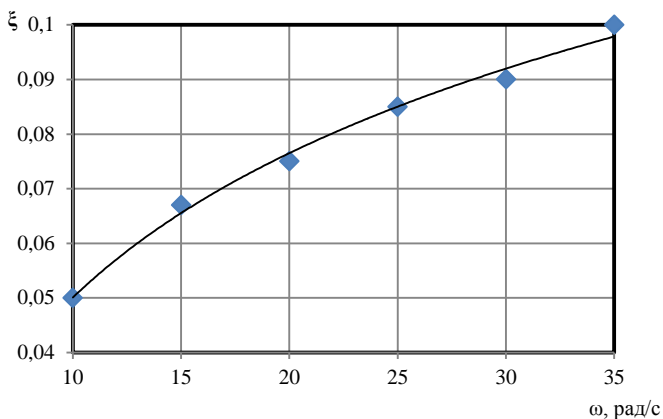


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента предельного увлажнения  $\xi$  от угловой скорости вращения  $\omega$  дна

Представленная зависимость позволяет определить условия прилипания семян друг к другу и к стенкам камеры смешивания. Повышение угловой скорости вращения дна с 10 до 35 рад/с влечет за собой увеличение значения коэффициента предельного увлажнения в 2 раза. Это обусловлено тем, что с увеличением угловой скорости возрастает действующая на семена центробежная сила, которая преодолевает силы адгезии воды. Было отмечено, что с увеличением угловой скорости вращения дна и количества наносимой на семена жидкости они начинают двигаться в более плотном потоке и плохо разделяются между собой.

После определения значения коэффициента предельного увлажнения семян было определено соотношение сухой бленды с водой, при котором все частички сухого порошка бленды прилипали к увлажнен-

ной поверхности семян, образуя один слой оболочки. Оно составило 4:1.

В результате исследований было также установлено значение коэффициента изменения объема бленды ( $k_6$ ), которое составило 1,2.

#### 4.3. Результаты определения количества циклов обработки семян

Для получения семенного драже требуемого размера необходимо совершить несколько циклов обработки семян водой и блендой.

После определения количества бленды, необходимого для получения семенного драже определенного размера, а также количества бленды, вносимого за один цикл, было определено необходимое количество циклов для конкретного коэффициента изменения объема семян (рис. 4.2).

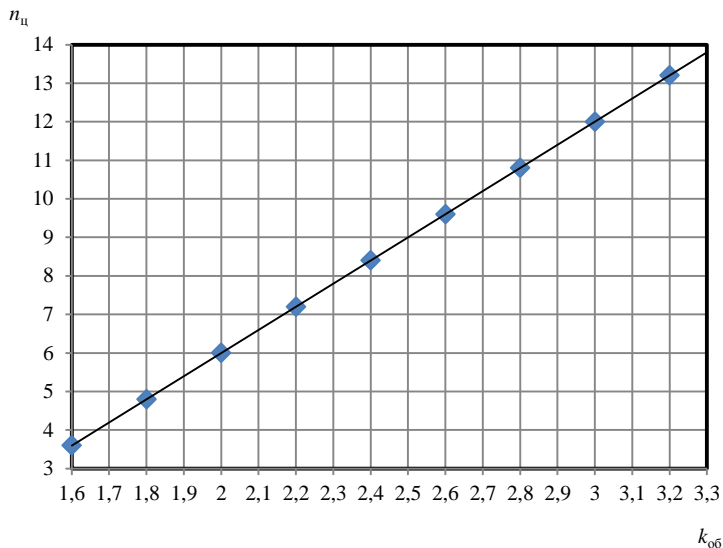


Рис. 4.2. Зависимость числа циклов  $n_{ц}$  обработки от коэффициента изменения объема  $k_{об}$  семян

Коэффициент изменения объема для дражированных семян диаметром 3,5...4,5 мм варьирует в пределах от 1,6 до 3,3. При эквивалентном диаметре семени 3,1 мм его эквивалентный объем составит

15,6 мм<sup>3</sup>, если сформировать из него семенное драже диаметром 4 мм, то его эквивалентный объем составит 33,51 мм<sup>3</sup>. При этом коэффициент изменения объема ( $k_{об}$ ) будет равен 2,15. Тогда из полученной зависимости (см. рис. 4.2) можно установить число циклов обработки, равное 7.

Время ввода бленды за один цикл не оказывает существенного влияния на протекающий процесс.

#### 4.4. Результаты однофакторных поисковых экспериментов

Поисковые исследования проводились для определения оптимальных интервалов варьирования факторов и степени их влияния на процесс дражирования семян. Объектом исследований являлся процесс дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с лопастным отражателем. Предметом исследования были конструктивные и технологические параметры центробежного дражиратора.

Опыты проводились в трехкратной повторности на семенах сахарной свеклы, предварительно отшлифованных до заданного размера. Лабораторная установка позволяла реализовать спланированную программу исследований и обеспечить варьирование основных факторов в установленных пределах.

Интервалы и границы варьирования факторов были определены на основании проведенных теоретических исследований движения семян в камере смешивания и априорной информации.

Схема поисковых исследований подразумевала поэтапное варьирование одного из факторов при фиксированных параметрах остальных на уровнях опорных точек, которые были выбраны на предварительных этапах экспериментов:  $\omega = 20$  рад/с;  $H_{от} = 0,03$  м;  $\alpha = \pi/3$  (60°);  $v = 0,2$ ;  $t_{об} = 400$  с;  $\kappa_{от} = 8$  шт.;  $l_{отр} = 0,04$  м;  $h_{отр} = 0,03$  м. При выборе рациональных интервалов изменения факторов руководствовались тем, что минимальное значение доли качественных семян в пробе должно быть в пределах 90 %.

Анализ полученных результатов изменения доли качественных семян в зависимости от угловой скорости вращения дна (табл. 4.2) показывает, что в интервале от 10 до 15 рад/с происходит увеличение оптимизирующего параметра на 35...40 % (рис. 4.3).

Таблица 4.2. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от угловой скорости вращения дна камеры смешивания

Показатели	Уровни варьирования угловой скорости вращения дна камеры смешивания, рад/с						Число уровней $n_{yp} = 6$
	10	15	20	25	30	35	
$D_{kc}$	0,5	0,88	0,91	0,96	0,9	0,78	
	0,49	0,89	0,92	0,96	0,9	0,77	
	0,51	0,87	0,93	0,96	0,9	0,79	
$m$	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
$\Sigma D_{kc}$	1,5	2,64	2,76	2,88	2,7	2,34	$\Sigma \Sigma D_{kc} = 14,82$
$\Sigma D_{kc}^2$	0,75	2,32	2,539	2,76	2,43	1,82	$\Sigma \Sigma D_{kc}^2 = 12,633$
$L = (\Sigma D_{kc})^2/m$	0,75	2,32	2,539	2,76	2,43	1,82	$\Sigma L = 12,6324$
$\Sigma D_{kc}/m$	0,5	0,88	0,92	0,96	0,9	0,78	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{kc})^2/N = 12,2$

$$C_X = \Sigma L - \Phi = 0,4306, C_Y = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Phi = 0,4314,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Sigma L = 0,0008, \sigma_X^2 = C_X / (n_{yp} - 1) = 0,08612, \sigma_Z = 0,00686,$$

$$\eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,998, F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 1830 > F_T = 2,7.$$

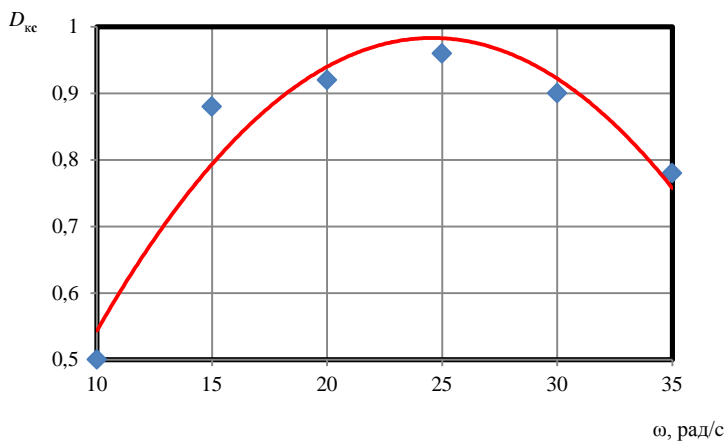


Рис. 4.3. Зависимость доли качественных семян  $D_{kc}$  в пробе от угловой скорости вращения  $\omega$  дна

В пределах изменения угловой скорости вращения дна от 15 до 30 рад/с качественный показатель близок к оптимальному, а при дальнейшем ее увеличении доля качественных семян снижается на 10...15 %. Это можно объяснить резонансными явлениями, наступающими при высоких угловых скоростях, вызывающих неустойчивую работу центробежного дражиратора. Таким образом, рациональным интервалом варьирования угловой скорости вращения дна является 15...30 рад/с.

Далее определялась зависимость доли качественных семян в пробе от высоты расположения лопастного отражателя (рис. 4.4), которая изменялась от 0 до 0,07 м.

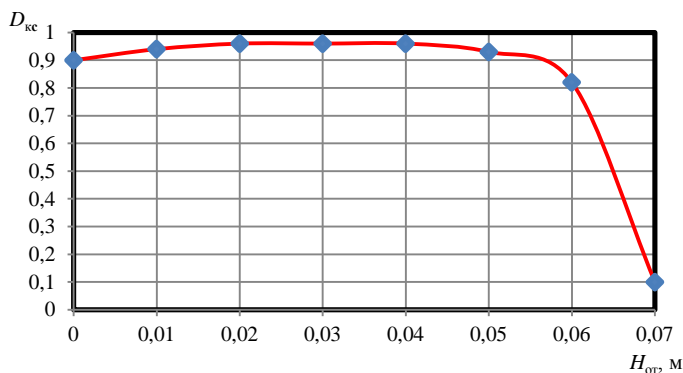


Рис. 4.4. Зависимость доли качественных семян  $D_{кв}$  в пробе от высоты  $H_{отр}$  расположения лопастного отражателя

Анализ полученных данных (табл. 4.3) позволяет сделать вывод о том, что при изменении высоты расположения лопастного отражателя до 0,04 м доля качественных семян повышается на 4...6 %. Дальнейшее увеличение высоты приводит к постепенному снижению качества семян. Это объясняется тем, что не все семена поднимаются до лопастного отражателя и двигаются по корпусу в виде шлейфа. При этом не происходит их перемешивание как между собой, так и с химическими компонентами. Увеличение высоты расположения лопастного отражателя более 0,06 м значительно ухудшает качество семенного драже. Для дальнейших экспериментальных исследований был выбран рациональный интервал изменения высоты лопастного отражателя – 0...0,06 м.

Таблица 4.3. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от высоты расположения лопастного отражателя

Показатели	Уровни варьирования высоты расположения лопастного отражателя, м								Число уровней $n_{yp} = 8$
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	
$D_{kc}$	0,88	0,94	0,95	0,95	0,96	0,92	0,82	0,1	
	0,91	0,95	0,96	0,96	0,96	0,93	0,81	0,1	
	0,91	0,93	0,97	0,97	0,96	0,94	0,83	0,1	
$m$	3	3	3	3	3	3	3	3	$N = 24$
$\Sigma D_{kc}$	2,7	2,82	2,88	2,88	2,88	2,79	2,46	0,3	$\Sigma \Sigma D_{kc} = 19,71$
$\Sigma D_{kc}^2$	2,43	2,65	2,76	2,76	2,76	2,59	2,017	0,03	$\Sigma \Sigma D_{kc}^2 = 18$
$L = (\Sigma D_{kc})^2 / m$	2,43	2,65	2,76	2,76	2,76	2,59	2,017	0,03	$\Sigma L = 18$
$\Sigma D_{kc} / m$	0,9	0,94	0,96	0,96	0,96	0,93	0,82	0,1	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{kc})^2 / N = 13,53$

$$C_X = \Sigma L - \Phi = 4,48682, C_Y = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Phi = 4,489,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Sigma L = 0,0022, \sigma_X^2 = C_X / (n_{yp} - 1) = 0,195,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,000096, \sigma_Z = 0,0098, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,999,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 2031 > F_T = 2,7.$$

Эксперименты по исследованию угла наклона образующей конуса дна дражиратора начинали со значения  $40^\circ$ . Для определения максимального значения угла были проведены предварительные эксперименты по изучению высоты поднятия семян [118], в результате которых было определено предельное значение угла, составляющее  $65^\circ$ . Результаты исследований (табл. 4.4) показывают, что при значениях угла менее  $45^\circ$  не все семена поднимаются на достаточную высоту при фиксированной угловой скорости (рис. 4.5). Увеличение угла свыше  $60^\circ$  приводит к снижению качественного показателя. Это объясняется тем, что при переходе с вращающегося дна на корпус осуществляется удар семян о стенку корпуса, который сопровождается не только их травмируемостью, но и нарушением стабильного движения их потока.

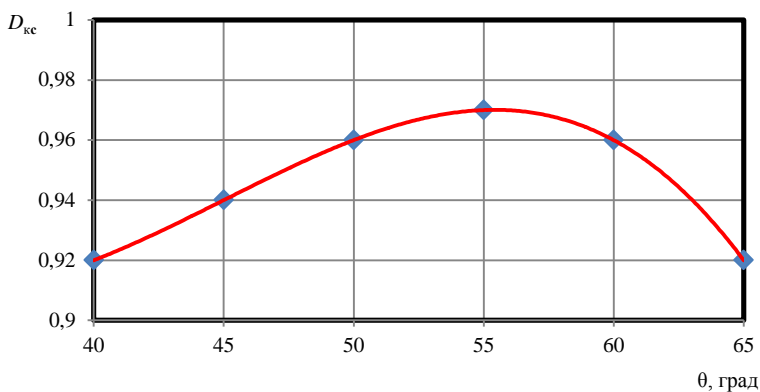


Рис. 4.5. Зависимость доли качественных семян  $D_{кc}$  в пробе от угла  $\theta$  наклона образующей конуса дна дражироватора

Таблица 4.4. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от угла наклона образующей конуса дна дражироватора

Показатели	Уровни варьирования угла наклона образующей конуса дна дражироватора, град						Число уровней $n_{yp} = 6$
	40	45	50	55	60	65	
$D_{кc}$	0,91	0,94	0,96	0,96	0,96	0,91	
	0,93	0,93	0,96	0,97	0,96	0,93	
	0,92	0,95	0,96	0,95	0,96	0,92	
$m$	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
$\Sigma D_{кc}$	2,76	2,82	2,88	2,91	2,88	2,76	$\Sigma \Sigma D_{кc} = 17,01$
$\Sigma D_{кc}^2$	2,539	2,651	2,765	2,8227	2,765	2,539	$\Sigma \Sigma D_{кc}^2 = 16,0825$
$Л = (\Sigma D_{кc})^2 / m$	2,539	2,65	2,7648	2,8227	2,7648	2,539	$\Sigma Л = 16,0815$
$\Sigma D_{кc} / m$	0,92	0,94	0,96	0,97	0,96	0,92	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{кc})^2 / N = 16,074$

$$C_X = \Sigma Л - \Phi = 0,0075, C_Y = \Sigma \Sigma D_{кc}^2 - \Phi = 0,0085,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{кc}^2 - \Sigma Л = 0,001, \sigma_X^2 = C_X / (n_{yp} - 1) = 0,0015,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 5,88 \cdot 10^{-5}, \sigma_Z = 0,0077, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,882,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 25,5 > F_T = 2,7.$$

На основании зависимости (см. рис. 4.5) был сделан вывод о том, что оптимальный интервал варьирования угла наклона дна дражиратора находится в пределах от 50 до 60°. С учетом того что доля качественных семян в указанном интервале изменяется незначительно и соответствует требованию по минимальному значению, для сокращения числа экспериментов в дальнейшем этот параметр был зафиксирован на уровне 60°.

Коэффициент загрузки камеры смешивания изменялся в диапазоне от 0,1 до 0,6.

По полученным экспериментальным данным (табл. 4.5) была построена графическая зависимость (рис. 4.6).

Таблица 4.5. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от коэффициента загрузки камеры смешивания

Показатели	Уровни варьирования коэффициента загрузки камеры смешивания						Число уровней $n_{ур} = 6$
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
$D_{кc}$	0,84	0,92	0,95	0,93	0,8	0,55	
	0,83	0,92	0,97	0,94	0,84	0,62	
	0,88	0,92	0,96	0,95	0,85	0,63	
$m$	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
$\Sigma D_{кc}$	2,55	2,76	2,88	2,82	2,49	1,8	$\Sigma \Sigma D_{кc} = 15,3$
$\Sigma D_{кc}^2$	2,1689	2,5392	2,765	2,651	2,0681	1,0838	$\Sigma \Sigma D_{кc}^2 = 13,276$
$\text{Л} = (\Sigma D_{кc})^2 / m$	2,1675	2,5392	2,7648	2,6508	2,0667	1,08	$\Sigma \text{Л} = 13,269$
$\Sigma D_{кc} / m$	0,85	0,92	0,96	0,94	0,83	0,6	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{кc})^2 / N = 13,01$

$$C_X = \Sigma \text{Л} - \Phi = 0,264, C_Y = \Sigma \Sigma D_{кc}^2 - \Phi = 0,271,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{кc}^2 - \Sigma \text{Л} = 0,007, \sigma_X^2 = C_X / (n_{ур} - 1) = 0,0528,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,000412, \sigma_Z = 0,0203, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,974,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 128 > F_T = 2,7.$$

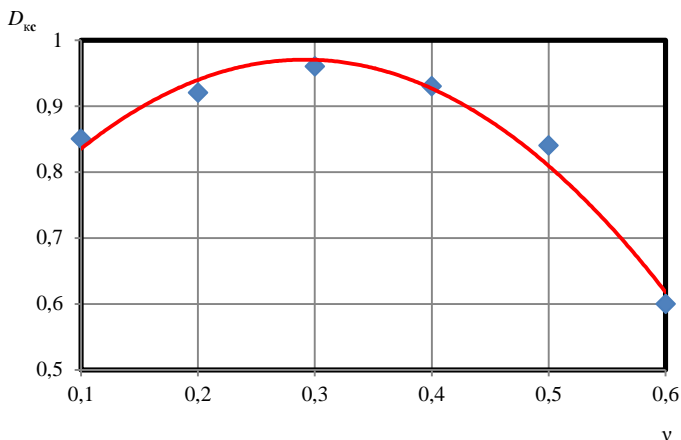


Рис. 4.6. Зависимость доли качественных семян  $D_{кв}$  в пробе от коэффициента загрузки  $v$  камеры смешивания

Было установлено, что при значении коэффициента загрузки камеры смешивания меньше 0,2 (20 %) семена не формируют целостного потока и хаотически отражаются от лопастей отражателя. Процесс дражирования протекает в нестабильном режиме.

При значении коэффициента загрузки камеры смешивания свыше 0,4 семена движутся в слишком плотном потоке, что затрудняет проникновение и перераспределение химических компонентов в потоке семян. Соответственно это снижает качество обработки.

При значении коэффициента загрузки камеры смешивания, близком к 0,3, наблюдается увеличение доли качественных семян в пробе до 96 % с последующим ее снижением до уровня 60 % при коэффициенте загрузки 0,6. Поэтому наиболее рациональными границами варьирования параметра коэффициента загрузки является интервал от 0,2 до 0,4.

На следующем этапе исследований была установлена зависимость доли качественных семян от времени обработки. Время обработки изменялось в диапазоне от 300 до 1300 с. Анализ полученных данных (табл. 4.6), представленных графически на рис. 4.7, показал, что при изменении времени обработки от 300 до 650 с доля качественных семян возрастает на 20...25 %.

Таблица 4.6. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от времени обработки семян

Показатели	Уровни варьирования времени обработки семян, с						Число уровней $n_{yp} = 6$
	300	500	700	900	1100	1300	
$D_{kc}$	0,68	0,95	0,95	0,87	0,78	0,7	
	0,7	0,96	0,94	0,87	0,76	0,72	
	0,72	0,97	0,96	0,87	0,8	0,74	
$m$	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
$\Sigma D_{kc}$	2,1	2,88	2,85	2,61	2,34	2,16	$\Sigma \Sigma D_{kc} = 14,94$
$\Sigma D_{kc}^2$	1,47	2,765	2,7	2,27	1,826	1,556	$\Sigma \Sigma D_{kc}^2 = 12,6$
$Л = (\Sigma D_{kc})^2/m$	1,47	2,76	2,7	2,27	1,8252	1,55	$\Sigma Л = 12,593$
$\Sigma D_{kc}/m$	0,7	0,96	0,95	0,87	0,78	0,72	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{kc})^2/N = 12,4$

$$C_X = \Sigma Л - \Phi = 0,1932, C_Y = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Phi = 0,196,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Sigma Л = 0,0028, \sigma_X^2 = C_X / (n_{yp} - 1) = 0,0386,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,000165, \sigma_Z = 0,0128, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,986,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 234,6 > F_T = 2,7.$$

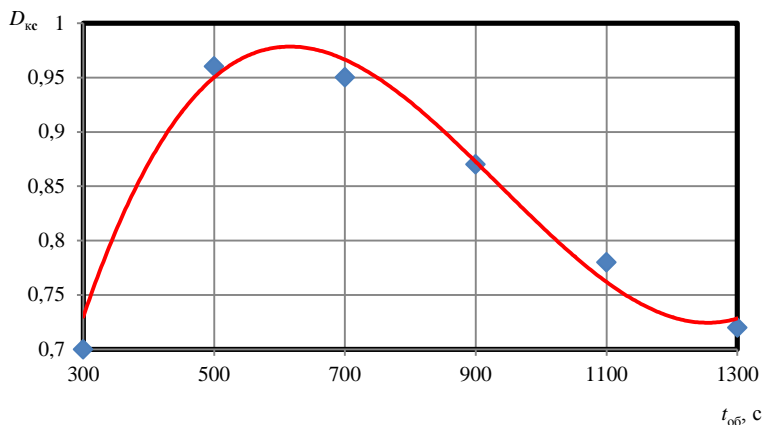


Рис. 4.7. Зависимость доли качественных семян  $D_{kc}$  в пробе от времени обработки  $t_{об}$  семян

При дальнейшем увеличении времени обработки доля качественных семян в пробе уменьшается. Это можно объяснить тем, что полученная оболочка начинает разрушаться из-за длительного взаимодействия семян в камере смешивания. На основании этого был выбран рациональный интервал варьирования временного промежутка в пределах от 400 до 800 с.

Полученная по экспериментальным данным (табл. 4.7) графическая зависимость (рис. 4.8) свидетельствует о повышении доли качественных семян в пробе с увеличением количества лопастей отражателя.

Таблица 4.7. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от количества лопастей в отражателе

Показатели	Уровни варьирования количества лопастей в отражателе, шт.					Число уровней $n_{yp} = 5$
	4	6	8	10	12	
$D_{kc}$	0,7	0,91	0,94	0,95	0,97	
	0,72	0,89	0,93	0,96	0,95	
	0,74	0,9	0,95	0,94	0,96	
$m$	3	3	3	3	3	$N = 15$
$\Sigma D_{kc}$	2,16	2,7	2,82	2,88	2,88	$\Sigma \Sigma D_{kc} = 13,41$
$\Sigma D_{kc}^2$	1,556	2,4302	2,651	2,765	2,765	$\Sigma \Sigma D_{kc}^2 = 12,11$
$L = (\Sigma D_{kc})^2 / m$	1,5552	2,43	2,6508	2,7648	2,7648	$\Sigma L = 12,108$
$\Sigma D_{kc} / m$	0,72	0,9	0,94	0,96	0,96	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{kc})^2 / N = 11,99$

$$C_X = \Sigma L - \Phi = 0,1198, C_Y = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Phi = 0,1214,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{kc}^2 - \Sigma L = 0,0016, \sigma_X^2 = C_X / (n_{yp} - 1) = 0,02994,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,000114, \sigma_Z = 0,0107, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,987,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 262 > F_T = 2,9.$$

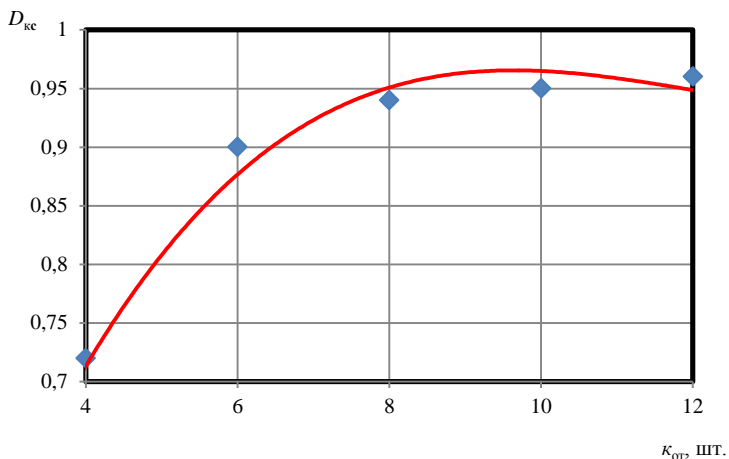


Рис. 4.8. Зависимость доли качественных семян  $D_{кв}$  в пробе от количества лопастей  $\kappa_{от}$  в отражателе

Анализируя полученную зависимость (см. рис. 4.8), можно сделать вывод о том, что минимальное количество лопастей, при котором достигается приемлемое качество семян, составляет 6 шт. Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования проводились при числе лопастей 6, 8, 10 и 12.

Длину лопасти отражателя изменяли в диапазоне от 0,01 до 0,06 м. Полученная в результате исследований (табл. 4.8) зависимость (рис. 4.9) свидетельствует о том, что доля качественных семян в пробе возрастает почти в 2 раза при увеличении длины с 0,01 до 0,04 м, при дальнейшем увеличении длины существенных изменений не происходит.

Это можно объяснить тем, что при малой длине лопасти не все обрабатываемые семена способны отразиться лопастью и создать «завесу» для эффективной обработки. При длине лопасти 0,04 м все семена отражаются от лопастей, что способствует эффективному разрушению полосового потока. Поэтому данный параметр был зафиксирован на отметке 0,04 м.

Таблица 4.8. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от длины лопасти отражателя

Показатели	Уровни варьирования длины лопасти отражателя, м						Число уровней
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	
$D_{\text{кc}}$	0,4	0,6	0,89	0,94	0,95	0,93	$n_{\text{ур}} = 6$
	0,41	0,6	0,9	0,94	0,93	0,93	
	0,39	0,6	0,91	0,94	0,94	0,93	
$m$	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
$\Sigma D_{\text{кc}}$	1,2	1,8	2,7	2,82	2,820	2,79	$\Sigma \Sigma D_{\text{кc}} = 14,13$
$\Sigma D_{\text{кc}}^2$	0,4802	1,08	2,432	2,658	2,651	2,597	$\Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 = 11,887$
$\Pi = (\Sigma D_{\text{кc}})^2 / m$	0,48	1,08	2,43	2,658	2,658	2,597	$\Sigma \Pi = 12,886$
$\Sigma D_{\text{кc}} / m$	0,4	0,6	0,9	0,94	0,94	0,93	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{\text{кc}})^2 / N = 11,09$

$$C_X = \Sigma \Pi - \Phi = 0,794, C_Y = \Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 - \Phi = 0,795,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 - \Sigma \Pi = 0,0006, \sigma_X^2 = C_X / (n_{\text{ур}} - 1) = 0,159,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,000035, \sigma_Z = 0,0059, \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,999,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 4501 > F_T = 2,7.$$

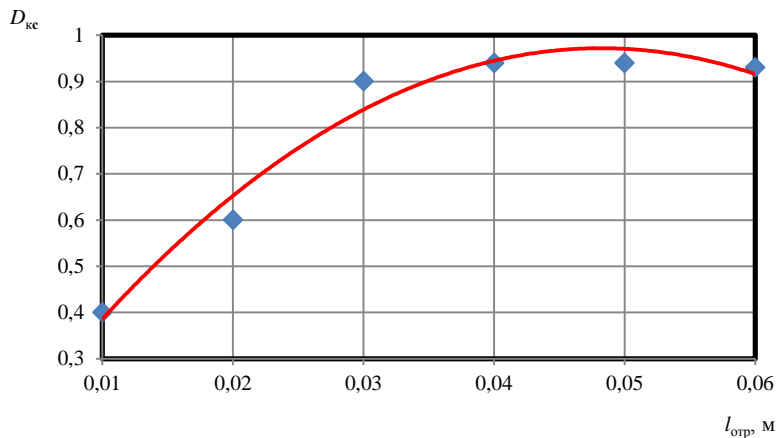


Рис. 4.9. Зависимость доли качественных семян  $D_{\text{кc}}$  в пробе от длины лопасти  $l_{\text{отр}}$  отражателя

Высоту лопасти отражателя изменяли в диапазоне от 0,01 до 0,05 м.

Анализируя полученную на основании экспериментальных данных (табл. 4.9) зависимость (рис. 4.10), можно сделать вывод о том, что достаточное качество дражированных семян обеспечивается при высоте лопасти отражателя в диапазоне от 0,03 до 0,05 м. Поскольку варьирование данного фактора имеет определенные трудности из-за необходимости изготовления большого количества лопастей разной геометрии, было принято решение зафиксировать его значение на отметке 0,03 м.

Таблица 4.9. Алгоритм однофакторного анализа зависимости доли качественных семян в пробе от высоты лопасти отражателя

Показатели	Уровни варьирования высоты лопасти отражателя, м					Число уровней
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	
$D_{\text{кc}}$	0,4	0,8	0,93	0,94	0,94	$n_{\text{yp}} = 5$
	0,4	0,81	0,94	0,94	0,93	
	0,4	0,79	0,95	0,94	0,92	
$m$	3	3	3	3	3	$N = 15$
$\Sigma D_{\text{кc}}$	1,2	2,4	2,82	2,82	2,79	$\Sigma \Sigma D_{\text{кc}} = 12,03$
$\Sigma D_{\text{кc}}^2$	0,48	1,9202	2,651	2,6508	2,5949	$\Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 = 10,3$
$\text{Л} = (\Sigma D_{\text{кc}})^2 / m$	0,48	1,92	2,6508	2,6508	2,5947	$\Sigma \text{Л} = 10,3$
$\Sigma D_{\text{кc}} / m$	0,4	0,8	0,94	0,94	0,93	$\Phi = (\Sigma \Sigma D_{\text{кc}})^2 / N = 9,65$

$$C_X = \Sigma \text{Л} - \Phi = 0,6482, \quad C_Y = \Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 - \Phi = 0,6488,$$

$$C_Z = \Sigma \Sigma D_{\text{кc}}^2 - \Sigma \text{Л} = 0,0006, \quad \sigma_X^2 = C_X / (n_{\text{yp}} - 1) = 0,162,$$

$$\sigma_Z^2 = C_Z / (N - 1) = 0,0000429, \quad \sigma_Z = 0,0065, \quad \eta_X^2 = C_X / C_Y = 0,999,$$

$$F_P = \sigma_X^2 / \sigma_Z^2 = 3781 > F_T = 2,9.$$

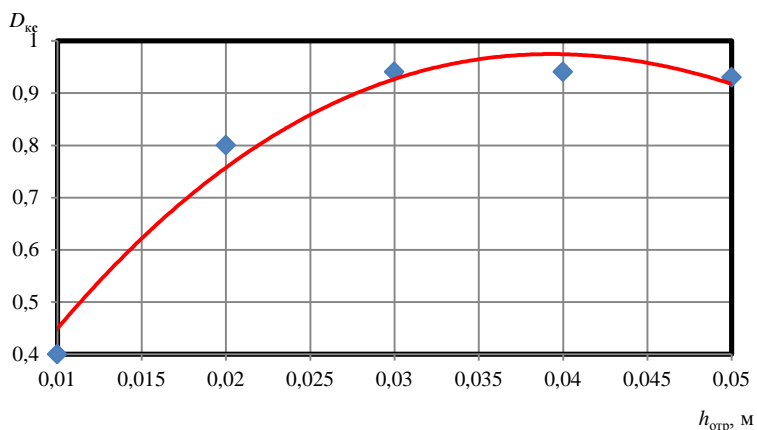


Рис. 4.10. Зависимость доли качественных семян  $D_{кв}$  в пробе от высоты лопасти  $h_{отр}$  отражателя

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод о том, что границы варьирования факторов, оказывающих влияние на процесс дражирования семян сахарной свеклы в предлагаемом оборудовании, изменяются в следующих диапазонах [120]:

- угловая скорость вращения дна  $\omega_{дн} = 10 \dots 30$  рад/с;
- высота расположения лопастного отражателя  $H_{отр} = 0 \dots 0,06$  м;
- коэффициент загрузки камеры смешивания  $\nu = 0,2 \dots 0,4$ ;
- время обработки  $t_{об} = 400 \dots 800$  с;
- количество лопастей в отражателе  $\kappa_{от} = 6 \dots 12$  шт.

На основании теоретических и экспериментальных исследований определенные параметры были зафиксированы: угол наклона образующей конуса дна дражировщика ( $\theta$ ) –  $60^\circ$  (1,05 рад); диаметр камеры смешивания ( $D_{к}$ ) – 0,515 м; угол наклона лопасти отражателя ( $\beta$ ) –  $35^\circ$  (0,61 рад); высота лопасти отражателя ( $h_{отр}$ ) – 0,03 м; длина лопасти отражателя ( $l_{отр}$ ) – 0,04 м; радиус распылителя ( $r_{рас}$ ) – 0,1 м; угловая скорость вращения распылителя ( $\omega_{рас}$ ) – 314 рад/с; высота расположения распылителя в камере смешивания связана с высотой лопастного отражателя; расход жидкости связующего раствора (воды) ( $Q_{ж}$ ) –  $1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; число циклов обработки ( $n_{ц}$ ) – 7.

Результаты однофакторных поисковых экспериментов использовали для определения факторного пространства с выбором области, предполагающей шаговое движение к оптимуму.

#### 4.5. Оптимизация процесса дражирования семян

Процесс дражирования семян – трудоемкий технологический процесс. При его протекании взаимодействует множество факторов, поэтому задача их оптимизации является достаточно сложной. Ее решение возможно методом оптимальной организации планирования эксперимента [53], позволяющим значительно сократить количество опытов, дать статистическую оценку результатов исследований, а также построить адекватную математическую модель изучаемого процесса.

Метод оптимальной организации планирования эксперимента предусматривает проведение ряда последовательных этапов, основная задача которых заключается в подборе величин выбранных факторов таким образом, чтобы они обеспечивали наивысшее качество получаемого семенного драже семян сахарной свеклы.

На предварительном этапе по результатам анализа априорной информации, теоретических исследований и поисковых экспериментов были выявлены факторы, существенно влияющие на процесс дражирования семян сахарной свеклы, и определены границы их варьирования (табл. 4.10).

Таблица 4.10. Факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Границы варьирования	
		нижняя (-1)	верхняя (+1)
Угловая скорость вращения дна камеры смешивания $\omega$ , рад/с	$X_1$	15	30
Коэффициент загрузки камеры смешивания $v$	$X_2$	0,2	0,4
Количество лопастей в отражателе $k_{от}$ , шт.	$X_3$	6	12
Высота расположения лопастного отражателя $H_{от}$ , м	$X_4$	0	0,06
Время обработки семян $t_{об}$ , с	$X_5$	400	800

В результате проведения поисковых экспериментов было установлено, что дражирование семян сахарной свеклы в предлагаемом центробежном дражираторе с лопастным отражателем при изменении факторов (табл. 4.10) в указанных границах повышает качество формирования оболочки на поверхности семян. Данные факторы являются управляемыми и контролируруемыми.

Параметром оптимизации была принята доля качественных семян в пробе.

Опыты проводили на лабораторной установке с диаметром корпуса камеры смешивания 0,515 м (выбор обусловлен предположительной производительностью дражжирователя) с радиусом дискового распылителя 0,1 м (параметр был зафиксирован на основании теоретических исследований [114]).

При фиксированных выбранных параметрах по схеме, повторяющей технологическую схему изучаемого процесса, семена в течение времени  $t_{об}$  (время проведения опыта) обрабатывали и проводили оценку соотношения качественных семян в пробе по стандартной методике [60].

На первом этапе оптимизации достаточно небольшого числа опытов. Уже по их результатам можно оценить влияние выбранных факторов на изучаемый процесс и определить направление движения к оптимуму при проведении дальнейших экспериментов.

Из векторного анализа известно, что направление наискорейшего изменения функции определяет ее вектор-градиент:

$$\vec{\text{grad}}( ) = \frac{\partial}{\partial x_1} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial x_2} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial x_n} \vec{k} + \dots, \quad (4.1)$$

где  $\frac{\partial}{\partial x_n}$  – частные производные функции отклика по  $n$ -му фактору;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, \dots$  – орты координатных осей соответствующих факторов.

Установлено [53, 60], что координаты вектор-градиента в точке равны соответствующим коэффициентам регрессии полинома первой степени, который аппроксимирует поверхность отклика в окрестности рассматриваемой точки, поэтому на первом шаге исследований вычисляли коэффициенты  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  линейной модели, аппроксимирующей экспериментальные данные:

$$Y(D_{кc}) = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5. \quad (4.2)$$

При отыскании линейной модели факторы достаточно варьировать на двух уровнях, которые условно принимаются соответственно «нижним» и «верхним». В качестве таких уровней в нашем случае были взяты границы факторного пространства из табл. 4.10, помеченные знаками  $(-1)$  – нижний уровень,  $(+1)$  – верхний уровень. При этом был реализован полнофакторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^5$  с матрицей планирования  $X$ , имеющей 32 сочетания уровней факторов (число

опытов  $N = 2^5 = 32$ ). Матрица ПФЭ (прил. Б) в кодированном виде формировалась по принципу чередования знаков, согласно которому первый вектор-столбец состоял из единиц и отвечал за определение свободного члена линейной зависимости  $b_0$ , во втором знаки менялись через один, в третьем – через два, в четвертом – через четыре, в пятом – через восемь. Усредненные результаты экспериментальных исследований в опытах по результирующему параметру, согласно матрице планирования, представлены в прил. В.

После подтверждения на основании критерия Кохрена гипотезы об однородности ряда скорректированных дисперсий [60] на основании экспериментальных данных (прил. В) были определены эмпирические коэффициенты линейной регрессии по параметру оптимизации  $D_{\text{кв}}$  (табл. 4.11).

Таблица 4.11. Коэффициенты линейной регрессии

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
0,887	0,0139	0,0109	0,0285	0,0039	-0,0074

Для вычисления коэффициентов регрессии пользовались следующей формулой в матричном виде [53, 60]:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (4.3)$$

где  $X$  – матрица планирования эксперимента;

$Y$  – вектор-столбец значений параметра оптимизации ПФЭ;

$B$  – вектор-столбец эмпирических коэффициентов многофакторной регрессии.

Для оценки качества полученных моделей и полноты набора объяснительных факторов, входящих в них, в своих исследованиях нами использовались такие статистические характеристики, как коэффициенты детерминации  $R^2$  и множественной корреляции  $R$ , а также критерий Фишера  $F$  ( $F$ -критерий) и Стьюдента  $t$  ( $t$ -критерий).

Для вычисления их использовали следующие расчетные формулы в матричной форме:

$$R^2 = \frac{S_{\text{рег}}}{S_{\text{общ}}} = 1 - \frac{S_{\text{ост}}}{S_{\text{общ}}} = 1 - \frac{Y^T Y - B^T X^T Y}{Y^T Y - \frac{1}{N} (I^T Y)^2}; \quad (4.4)$$

$$R = \sqrt{R^2}; \quad (4.5)$$

$$F = \frac{MS_{\text{рег}}}{MS_{\text{ост}}} = \frac{S_{\text{рег}}}{df_1} : \frac{S_{\text{ост}}}{df_2} = \frac{(N - m_{\phi} - 1)}{m_{\phi}} \frac{Y^T Y - \frac{1}{N} (I^T Y)^2}{Y^T Y - B^T X^T Y} = 1; \quad (4.6)$$

$$t_i = \frac{B_i}{s_{bi}} = \frac{B_i}{\sqrt{MS_{\text{ост}} (X^T X)^{-1}_{ii}}}, \quad i = \overline{0, m_{\phi}}, \quad (4.7)$$

где  $S_{\text{ост}}$  – сумма квадратов регрессионных остатков;

$S_{\text{общ}}$  – общая дисперсия;

$S_{\text{рег}}$  – доля дисперсии, которая обусловлена регрессией;

$df_1 = m_{\phi}$ ,  $df_2 = N - m_{\phi} - 1$  – числа степеней свободы;

$MS_{\text{рег}}$ ,  $MS_{\text{ост}}$  – несмещенные оценки дисперсии, обусловленной соответственно регрессией и остаточной компонентой;

$I$  – столбец из  $N$  единиц;

$m_{\phi}$  – количество коэффициентов регрессии при независимых факторах;

$(X^T X)^{-1}_{ii}$  –  $i$ -й диагональный элемент ковариационно-дисперсионной матрицы оценок коэффициентов  $(X^T X)^{-1}$ ;

$s_{bi}$  – стандартные ошибки оценки коэффициентов.

Коэффициент детерминации  $R^2$  показывает ту часть изменения параметра оптимизации  $Y$  в полученной математической модели, которая обусловлена влиянием на нее независимых факторов.

Коэффициент множественной корреляции отображает плотность связи и точность модели и может использоваться при любой форме связи. Для облегчения выводов относительно практической значимости полученной модели показателю плотности связи дается качественная оценка на основании шкалы Чеддока.

Для проверки значимости математической модели используется  $F$ -критерий. Если вычисленное значение  $F$ -критерия меньше его критического значения, которое определяется по соответствующей статистической таблице, то значение коэффициента детерминации признается существенным (неслучайным), а модель – значащей. При опреде-

лении критического значения  $F$ -критерия учитывается принятый уровень значимости  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $df_1$  и  $df_2$ .

$t$ -статистика необходима, чтобы проанализировать значимость отдельных коэффициентов регрессии, т. е. обнаружить, насколько вычисленные параметры регрессионного уравнения характерны для конкретного комплекса условий, не являются ли полученные значения параметров уравнения регрессии действием случайных причин. Это осуществляется путем проверки нулевой гипотезы о равенстве нулю соответствующего параметра уравнения. Если абсолютная величина расчетного значения  $t$ -критерия соответствующего коэффициентам регрессии с  $df_2$  степенями свободы превышает его критическое значение (табличное значение) при заданном уровне значимости  $\alpha$ , то коэффициент регрессии признается значимым. Это говорит о том, что соответствующий независимый фактор, при котором находится этот коэффициент регрессии, оказывает существенное влияние на изучаемый процесс. В противном случае фактор следует вывести из математической модели, при этом ее качество существенно не ухудшится.

Статистические характеристики линейной регрессии процесса получения семенного драже в кодированном виде приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12. Статистические характеристики линейной регрессии

Статистические параметры	$D_{кс} = 0,887 + 0,0139X_1 + 0,0109X_2 + 0,0285X_3 + 0,0039X_4 - 0,0074X_5$	
$R^2$	0,93	93 % изменений функции отклика объясняются включенными в модель факторами
$R$	0,96	Связь сильная
$F$	64,67	$R^2$ незначим*
$t_{b0}$	461,2	Значим**
$t_{b1}$	7,2	Значим**
$t_{b2}$	5,69	Значим**
$t_{b3}$	14,8	Значим**
$t_{b4}$	2,06	Значим**
$t_{b5}$	-3,87	Значим**

\* При  $F_{кр} = 2,59$ . \*\* При  $t_{кр} = 2,06$ .

Расчеты параметров линейной регрессии и их статистическую оценку производили в прикладной программе Microsoft Excel при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и степенях свободы  $df_1 = 5$ ,  $df_2 = 26$ . Анализ линейной модели (см. табл. 4.12) показывает, что включенные в модель факторы являются значимыми, хорошо объясняют изменения параметра оптимизации и между ними существует сильная связь. Однако сравнительная оценка расчетного и табличного критериев Фишера показала, что гипотезу об описании результатов экспериментов линейной моделью следует отвергнуть. В этой связи дальнейшие исследования были посвящены поиску более сложной модели для изучения и описания области оптимума.

Несмотря на то, что линейная модель для рассматриваемого процесса оказалась неадекватной, на втором этапе оптимизации мы провели движение по градиенту с учетом полученных коэффициентов линейной регрессии в кодированном виде (табл. 4.13), предполагая, что при таком движении можно установить более благоприятные условия для проведения следующей стадии эксперимента.

Таблица 4.13. Результаты движения по градиенту

Факторы	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$D_{\text{кв}}$	Примечание
0-уровень	22,5	0,3	9	0,03	600		$\min b_i I_i  = 0,001$ , т. е. $b_6 I_6 = 0,001$ , $b_6 = 0,0109$ , $a_{\text{пр}} = 1/0,0109 = 91,7$
$I_i$	7,5	0,1	3	0,03	200		
$b_i$	0,0139	0,0109	0,0285	0,0039	-0,0074		
$b_i I_i$	0,104	0,001	0,086	0,0012	-1,488		
Расчетный шаг $\Delta X_i$	9,5	0,1	7,8	0,009	-137		
Скорректированный шаг $\Delta X_i$	5	0,1	3	0,01	-120		
<b>Движение по градиенту (при кругом восхождении)</b>							
Движение к оптимуму	22,5	0,3	9	0,03	600	0,92	Точка, близкая к оптимуму
	27,5	0,4	12	0,04	480	0,98	
	32,5	0,4	12	0,05	360	0,95	
	32,5	0,4	12	0,06	360	0,93	

Такое движение осуществляли путем пропорционального изменения факторов в зависимости от оценок координат вектора-градиента, в качестве которых принимали соответствующие коэффициенты линейной модели в кодированном виде. Движение начинали из центра определенного плана (с нулевого уровня) путем добавления к нему последовательно шага, удвоенного шага, утроенного шага и т. д. Тем самым получали условия мысленных опытов. При этом шаг движения по каждому фактору в натуральных единицах определяли по формуле [60]:

$$\Delta X_i = \pm a_{np} \cdot b_i \cdot I_i, \quad (4.8)$$

где  $a_{np}$  – коэффициент пропорциональности;

$I_i$  – расстояние от центра плана по изучаемому фактору до любой из границ (в натуральных единицах).

Знак «+» в формуле соответствует движению к максимуму функции отклика, а знак «-» – к минимуму. Коэффициент пропорциональности  $a_{np}$  выбирали после определения всех произведений  $b_i I_i$ . Наименьшее по абсолютной величине произведение принимали за базу, т. е.  $\min |b_i I_i| = b_6 I_6$ . Тогда  $a_{np}$  определяли как

$$a_{np} = 1/b_6. \quad (4.9)$$

После установления шагов  $\Delta X_i$  по каждому из факторов их корректировали до удобных для проведения эксперимента величин  $\Delta X'_i$ . Движение по градиенту продолжали до получения наилучшего значения функции отклика или достижения границ по каждому из факторов. При движении по градиенту фактор, достигший одной из границ области определения, фиксировался на этой границе, а движение по другим факторам продолжалось. Незначимые факторы при движении по градиенту фиксировались на нулевом уровне. Результаты движения по градиенту по результирующим факторам показаны в табл. 4.13.

Эти исследования позволили установить точки, близкие к оптимуму, и сузить границы варьирования факторов до следующих пределов:  $X_1$

На третьем этапе оптимизации изучаемого процесса для более точного определения оптимума необходимо детальное изучение поверхности отклика в новоопределенных границах варьирования факторов. Как правило, в сельхозмашиностроении для изучения и описания процессов используют полиномы второй степени [60]. Планы, которые позволяют найти такие полиномы, называются планами второго порядка. В них факторы варьируют, по крайней мере, на трех уровнях. В качестве нулевого уровня в расчетах принимали середины определенных выше интервалов:  $X_1^0 = 26,25$ ,  $X_2^0 = 0,35$ ,  $X_3^0 = 10$ ,  $X_4^0 = 0,045$ ,  $X_5^0 = 500$ .

Для описания области оптимума в своих экспериментах мы использовали  $B_5$ -оптимальные планы [60], обеспечивающие максимально возможную точность предсказаний при числе факторов  $m_{\phi} > 3$ . Матрица планирования такого плана при числе факторов, равном 5, состояла из ядра ПФЭ – 32 сочетания уровня варьирования факторов и 10 звездных точек на уровнях новых границ. По полученным опытным данным производили расчет коэффициентов регрессии по формуле (4.3). В качестве матрицы  $X$  использовали расширенную матрицу вида:

$$X \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{51} & x_{11}x_{21} & \dots & x_{41}x_{51} & x_{11}^2 & \dots & x_{51}^2 \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{52} & x_{12}x_{22} & \dots & x_{42}x_{52} & x_{12}^2 & \dots & x_{52}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{142} & \dots & x_{542} & x_{142}x_{242} & \dots & x_{442}x_{542} & x_{142}^2 & \dots & x_{542}^2 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

В результате последовательного исключения из моделей незначимых факторов (на основании  $t$ -статистики) матрица  $X$  в раскодированном виде приняла окончательный вид, согласно прил. Г. При этом были определены соответствующие значения параметра оптимизации (прил. Д).

По формуле (4.3) были получены коэффициенты полинома второй степени на основании приведенных значений параметра оптимизации  $D_{\text{к.}}$ . Вид этой зависимости в натуральных единицах и ее статистические характеристики, рассчитанные по формулам (4.4)–(4.7), показаны в табл. 4.13.

Таблица 4.14. Статистические характеристики нелинейных моделей эксперимента

Статистические параметры	$D_{\text{кк}} = -0,754 + 0,04428X_1 + 3,023X_2 + 0,1037X_3 + 1,2269X_4 -$ $- 0,053X_1X_4 + 0,00091X_3X_5 - 0,1324X_3X_4 + 0,00273X_4X_5 -$ $- 0,00077X_1^2 - 4,751X_2^2 - 0,00446X_3^2 - 0,00000044X_5^2$	
$R^2$	0,989	98,9 % изменений функции отклика объясняются включенными в модель факторами
$R$	0,994	Связь сильная
$F$	1,99	$R^2$ значим*
$t_{b0}$	-14,19	Значим**
$t_{b1}$	9,4	Значим**
$t_{b2}$	8,48	Значим**
$t_{b3}$	7,78	Значим**
$t_{b4}$	4,45	Значим**
$t_{b1b4}$	-8,05	Значим**
$t_{b3b5}$	12,49	Значим**
$t_{b3b4}$	-8,02	Значим**
$t_{b4b5}$	11,02	Значим**
$t_{b1b1}$	-8,65	Значим**
$t_{b2b2}$	-9,44	Значим**
$t_{b3b3}$	-7,05	Значим**
$t_{b5b5}$	-15,68	Значим**

\* При  $F_{\text{кр}} = 2,1$ . \*\* При  $t_{\text{кр}} = 2,045$ .

Анализ характеристик квадратичной модели процесса дражирования семян сахарной свеклы в камере смешивания дражиратора с лопастным отражателем подтвердил адекватность полученной математической модели

$$D_{\text{кк}} = -0,754 + 0,04428 \cdot v + 3,023 \cdot v + 0,1037 \cdot \kappa_{\text{от}} +$$

$$+ 1,2269 \cdot H_{\text{от}} - 0,053 \cdot H_{\text{от}} + 0,00091 \cdot v \cdot t_{\text{об}} -$$

$$- 0,1324 \cdot \kappa_{\text{от}} \cdot H_{\text{от}} + 0,00273 \cdot H_{\text{от}} \cdot t_{\text{об}} - 0,00077 \cdot v^2 -$$

$$- 4,751 \cdot v^2 - 0,00446 \cdot \kappa_{\text{от}}^2 - 0,00000044 \cdot t_{\text{об}}^2 \quad (4.11)$$

при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числах степеней свободы  $df_1 = 12$  и  $df_2 = 29$ . Это позволило утверждать, что погрешность вычислений при реализации данной модели не превысит 5 % в выбранном диапазоне варьирования факторов, а значит, ее можно использовать для нахождения оптимальных значений доли качественных семян  $D_{\text{кк}}$ .

После получения математической модели второго порядка следующий этап методики планирования сводился к определению наиболее

рациональных параметров процесса дражирования и изучению поверхности отклика в их окрестности. Изучение поверхности отклика проводили методом двумерных сечений [60]. Нахождение оптимальных параметров изучаемого процесса сводили к решению задачи математического программирования:

с целевой функцией

$$D_{\text{кс}} = -0,754 + 0,04428 \cdot v + 3,023 \cdot v + 0,1037 \cdot \kappa_{\text{от}} + 1,2269 \cdot H_{\text{от}} - 0,053 \cdot H_{\text{от}} + 0,00091 \cdot v \cdot t_{\text{об}} - 0,1324 \cdot \kappa_{\text{от}} \cdot H_{\text{от}} + 0,00273 \cdot H_{\text{от}} \cdot t_{\text{об}} - 0,00077 \cdot v^2 - 4,751 \cdot v^2 - 0,00446 \cdot \kappa_{\text{от}} - 0,00000044 \cdot t_{\text{об}}^2 \rightarrow \max, \quad (4.12)$$

с ограничениями

$$\begin{aligned} 22,5 &\leq v \leq 30; \\ 0,3 &\leq v \leq 0,4; \\ 9 &\leq \kappa_{\text{от}} \leq 12, \kappa_{\text{от}} = \text{целое}; \\ 0,03 &\leq H_{\text{от}} \leq 0,06; \\ 400 &\leq t_{\text{об}} \leq 600, t_{\text{об}} = \text{целое}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Решение оптимизационной задачи (4.12)–(4.13) производили в Microsoft Excel с помощью надстройки «Поиск решения» (прил. Е).

Решение оптимизационной задачи показало, что в предлагаемом центробежном дражираторе с лопастным отражателем за полный цикл обработки можно получить 99,5 % качественного семенного драже. При этом угловая скорость вращения дна дражиратора должна быть = 27,6 рад/с; коэффициент загрузки  $v = 0,36$  (36 %); количество лопастей  $\kappa_{\text{от}} = 12$  шт.; высота расположения лопастного отражателя  $H_{\text{от}} = 0,03$  м; время обработки семян  $t_{\text{об}} = 472$  с.

Изучение поверхности отклика проводилось методом двумерных сечений. В полученной модели второго порядка в закодированном виде определяли центр поверхности отклика путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю.

Далее проводили канонические преобразования модели второго порядка и определяли тип поверхности отклика в сечении. Полученные выражения подвергали графоаналитическому анализу, в основе которого использовали графики в координатах независимых переменных с натуральным масштабом (рис. 4.11).

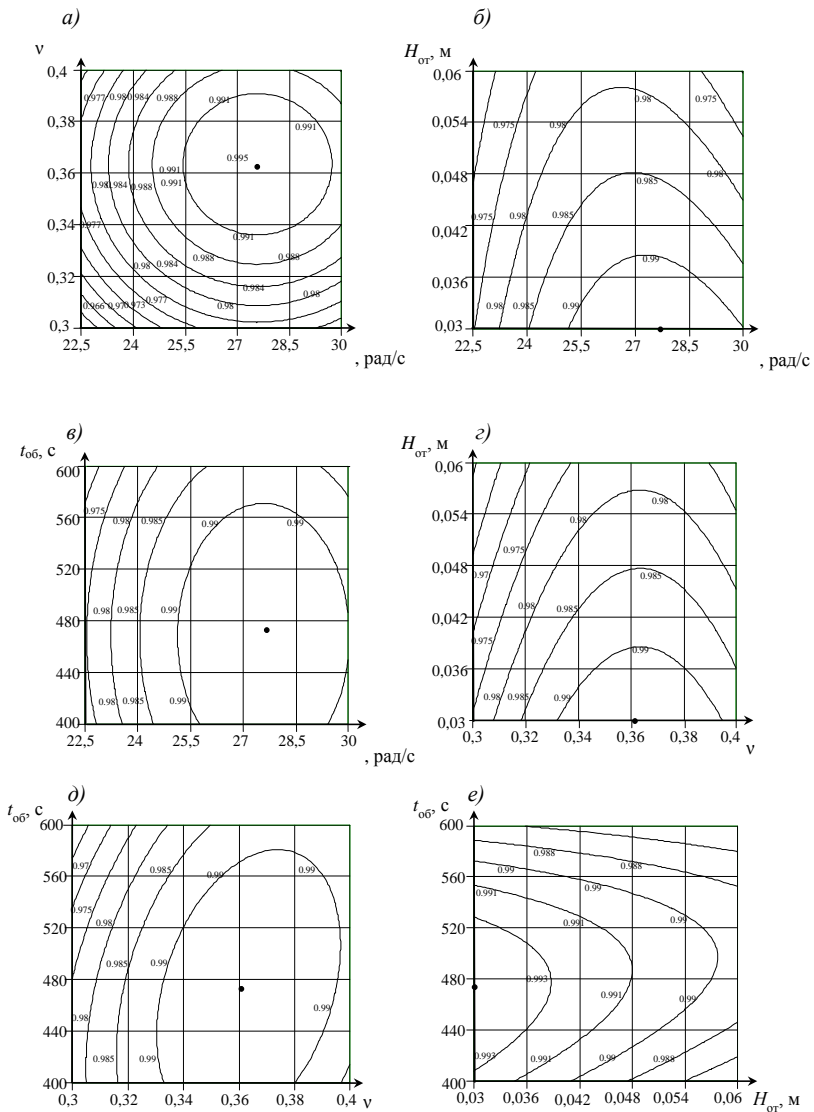


Рис. 4.11. Двумерные сечения поверхностей отклика:  
 а –  $\eta$  и  $\nu$ ; б –  $\eta$  и  $H_{от}$ ; в –  $\eta$  и  $t_{об}$  и  $\nu$ ; г –  $\eta$  и  $H_{от}$  и  $\nu$ ; д –  $\eta$  и  $t_{об}$  и  $\nu$ ; е –  $\eta$  и  $H_{от}$

Анализируя полученные графические зависимости, можно отметить, что область оптимума исследуемых факторов находится в следующих пределах:

- угловая скорость вращения дна – от 25,5 до 29 рад/с;
- коэффициент загрузки камеры смешивания – от 0,34 до 0,38;
- высота расположения лопастного отражателя – от 0,03 до 0,038 м;
- время обработки семян от 420 до 530 с.

Анализ результатов оптимизации процесса дражирования семян в центробежном дражираторе с лопастным отражателем позволил подтвердить гипотезу о зависимости качества обработки семян от его конструктивных и технологических параметров. Об этом свидетельствует одинаковая динамика изменения этих параметров и близкое нахождение их оптимумов.

## Выводы

1. Определены основные физико-механические свойства семян сахарной свеклы как материала для дражирования: эквивалентный диаметр – 3,0...3,1 мм; влажность – 7...9 %; коэффициент внутреннего трения – 0,55...0,56; коэффициент статического трения – 0,404...0,415; коэффициент динамического трения – 0,3...0,32; объемная масса семян – 407...424 кг/м<sup>3</sup>; масса 1000 семян – 13,2...13,6 г; коэффициент восстановления сухих семян – 0,42, влажных – 0,31, с оболочкой – 0,28. Также были определены свойства химических компонентов, наносимых на семена: объемная масса бленды – 610 кг/м<sup>3</sup>, размер частиц порошка бленды – от 80 до 125·10<sup>-6</sup> м. В качестве связующей жидкости использовали воду с параметрами: кинематической вязкостью  $\nu_{ж} = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , плотностью  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$  и коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_{ж} = 72,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ .

2. Получена зависимость коэффициента предельного увлажнения  $\xi$  от угловой скорости вращения  $\omega$  дна. Определено оптимальное соотношение сухого порошка (бленды) со связующей жидкостью (водой) при формировании оболочки семени, которое составило 4:1. Установлен коэффициент  $k_6$  изменения объема бленды, который равен 1,2. Для получения семенного драже в пределах фракции 3,5...4,5 мм было выбрано 7 циклов  $n_{ц}$  обработки.

3. Проведенные поисковые эксперименты позволили определить рациональные интервалы варьирования факторов при дражировании

семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с лопастным отражателем: угловая скорость вращения дна дражиратора – 15...30 рад/с; высота расположения лопастного отражателя – 0...0,06 м; коэффициент загрузки камеры смешивания – 0,1...0,4 (10...40 %); количество лопастей в отражателе – 6...12 шт.; время обработки семян – 400...800 с. Были зафиксированы: угол наклона образующей конуса дна дражиратора – 60° (1,05 рад); угловая скорость вращения распылителя – 314 рад/с; диаметр камеры смешивания – 0,515 м; высота расположения распылителя в камере смешивания связана с высотой лопастного отражателя; расход жидкости связующего раствора –  $1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; угол наклона лопасти отражателя – 35° (0,61 рад); высота лопасти отражателя – 0,03 м; длина лопасти отражателя – 0,04 м.

4. Получена математическая модель, описывающая процесс дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с лопастным отражателем и позволяющая определить значения основных факторов, при которых достигается максимальное качество дражированных семян (99,5 %) [123]: угловая скорость дна дражиратора – 27,6 рад/с; высота расположения лопастного отражателя – 0,03 м; коэффициент загрузки камеры смешивания – 0,36 (36 %); количество лопастей в отражателе – 12 шт.; время обработки семян – 472 с.

## 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### 5.1. Испытания центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция»

Производственные испытания разработанного центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем проводили в 2014 г. в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция» на подготовленных (отшлифованных) семенах сахарной свеклы отечественного сорта Белполь, полученных в условиях благоприятного климата. В качестве наполнителя для оболочки семян использовали blendу немецкой фирмы GTG, связующим компонентом являлась вода.

На рис. 5.1 представлены семена сахарной свеклы на разных стадиях обработки.

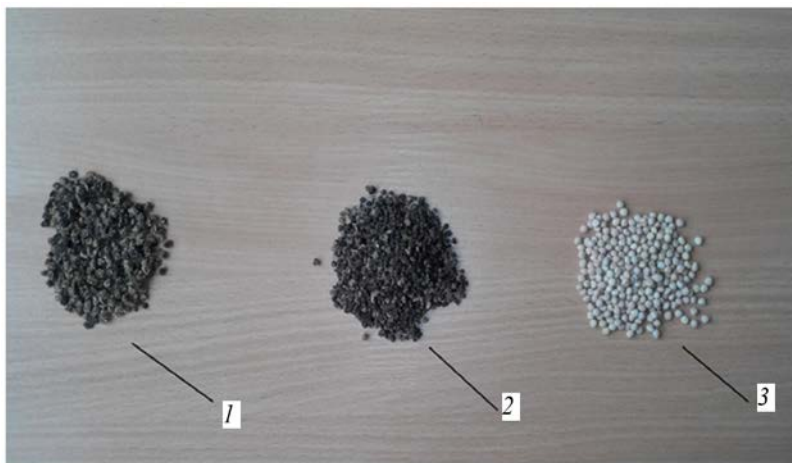


Рис. 5.1. Общий вид семян сахарной свеклы на разных стадиях обработки:  
1 – очищенные семена сахарной свеклы; 2 – отшлифованные семена сахарной свеклы;  
3 – дражированные семена сахарной свеклы

После получения дражированных семян их высевали на опытном поле (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Общий вид участков полевых испытаний дражированных семян

Результаты полевых испытаний показали, что полевая всхожесть обработанных дражированных семян составила 97...98 %, что соответствует требованиям ГОСТ 10882–98. Урожайность и сахаристость составила 750 ц/га и 16,58 % соответственно, что сопоставимо с импортными аналогами (табл. 5.1). Полученные результаты подтверждены протоколом производственных испытаний.

Таблица 5.1. Сравнительные результаты испытаний дражированных семян

Сорт	Фирма	Урожайность, ц/га	Сахаристость, %
Логан	Штрубе (Германия)	757	17,47
2 К 262	КВС (Германия)	755	15,8
Ангуе	Марибо (Дания)	778	16,65
Спландор	СЭС Вандерхаве (Бельгия)	745	17,75
Курлис	Флоримонд (Франция)	713	17,01
Белполь	–	750	16,58

Конструктивно-технологические параметры центробежного дражирователя семян сахарной свеклы с лопастным отражателем, используемого в производственных испытаниях, представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Конструктивно-технологические параметры центробежного дражирователя семян сахарной свеклы с лопастным отражателем

Наименование параметров	Значение
1	2
<b>Техническая характеристика</b>	
Установленная мощность дражирователя, кВт	2,5
Производительность за 1 ч основного времени, т	0,0345

Окончание табл. 5.2

1	2
Количество обслуживающего персонала, чел.	1
Габаритные размеры, м:	
длина	1,2
ширина	1,2
высота	1,8
Масса, кг	150
<b>Конструктивно-технологические параметры</b>	
Угловая скорость вращения дна дражиратора, рад/с	27,6
Угловая скорость вращения дискового распылителя, рад/с	314
Диаметр камеры смешивания, м	0,515
Угол наклона образующей конуса дна дражиратора, град	60
Объем дна дражиратора, м <sup>3</sup>	0,01
Высота расположения лопастного отражателя, м	0,03
Количество лопастей в отражателе, шт.	12
Радиус дискового распылителя, м	0,1
Расход жидкости связующего раствора, м <sup>3</sup> /с	$1 \cdot 10^{-5}$
Высота расположения дискового распылителя относительно нижнего основания дна дражиратора, м	0,13
<b>Условия работы</b>	
Коэффициент изменения объема	2,2
Влажность семян, %	7...9
Эквивалентный диаметр обрабатываемых семян, мм	3,0...3,1
Загрузка камеры смешивания семенами, м <sup>3</sup>	0,0036
<b>Качество работы</b>	
Доля качественных дражированных семян, %	98...99
Потребляемая мощность, кВт	От 2,5

По результатам проведенных производственных испытаний в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция» можно сделать заключение о том, что предлагаемый центробежный дражиратор семян сахарной свеклы с лопастным отражателем обеспечивает достаточно высокие качественные показатели процесса дражирования семян сахарной свеклы. Это подтверждается протоколом производственных испытаний.

## **5.2. Реализация результатов исследований**

Полученные по теме научной работы результаты исследований рассматривались как инициативная тематика, связанная с Государственной программой развития сахарной промышленности на 2011–2015 годы, которая утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 марта 2011 г. № 359. Исследования соответствуют направлению стратегии технологического развития Республики Беларусь на период до 2015 года, разработанной в соответствии с подпунктом 1.1.2 пункта 1 протокола поручений Президента Республики Беларусь от 21 мая 2010 г. № 13.

В 2014 г. получен акт внедрения результатов в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция».

Результаты исследований по научной работе рассмотрены в ООО НПП «Белама плюс» и приняты к использованию при разработке новой техники, предназначенной для дражирования семян.

Полученные материалы используются в УО БГСХА на кафедре сельскохозяйственных машин при изучении машин для химической обработки семян.

Научная новизна исследований подтверждается тремя патентами Республики Беларусь на полезную модель.

## **5.3. Методика расчета технологических параметров центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем**

Методика расчета технологических параметров центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с программой исследований по теме научной работы. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на параметры оптимизации процесса дражирования семян сахарной свеклы, являются: угловая скорость вращения дна дражиратора; коэффициент загрузки камеры смешивания; количество лопастей в лопастном отражателе; высота расположения лопастного отражателя; время обработки семян. Для получения качественных дражированных семян сахарной свеклы вышеуказанные факторы необходимо устанавливать на оптимальном уровне.

Расчет производительности дражировщика предлагаемой конструкции будет производиться по зависимости

$$Q_{др} = \frac{V_{дн} \nu k_{об}}{t_{об} t_3 t_в} \quad (5.1)$$

где  $V_{дн}$  – объем дна камеры смешивания, м<sup>3</sup>;

$\nu$  – коэффициент загрузки камеры смешивания, %;

$k_{об}$  – коэффициент изменения объема;

$\rho_д$  – объемная масса семенного драже, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{об}$  – время обработки семян в камере смешивания, с;

$t_3$  – время загрузки семян в камеру смешивания, с;

$t_в$  – время выгрузки готового семенного драже, с.

Для упрощения расчета технологических параметров центробежно-го дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем по результатам теоретических и экспериментальных исследований [122] разработана номограмма (рис. 5.3).

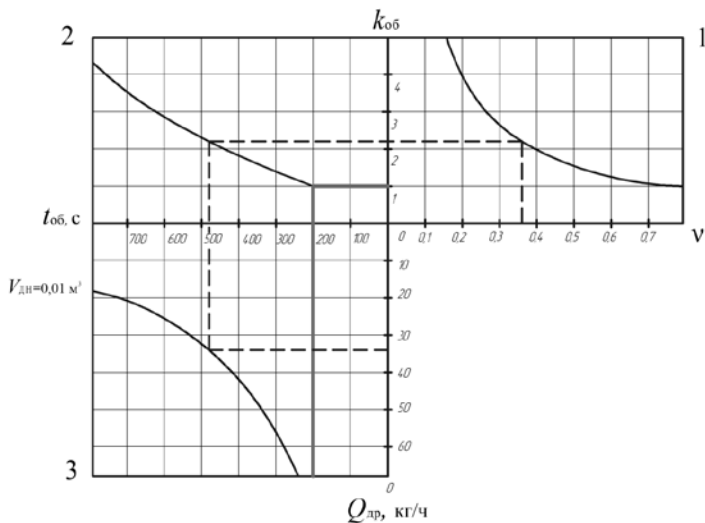


Рис. 5.3. Номограмма для определения технологических параметров центробежного дражировщика семян с лопастным отражателем

В первом квадранте номограммы (см. рис. 5.3) представлена зависимость коэффициента загрузки от коэффициента увеличения объема, во втором – зависимость коэффициента увеличения объема от времени

обработки, в третьем – зависимость производительности дражировщика от времени обработки для определенного объема дна.

Приведем пример использования номограммы. Исходные данные: необходимо обработать семена сахарной свеклы с коэффициентом изменения объема 2,2. Выбираем на вертикальной линии изменения  $k_{об}$  нужное значение (2,2) и проводим горизонтальную линию до пересечения с графиками в первом и втором квадрантах, получаем в первом квадранте коэффициент загрузки семян 0,36 (36 %), во втором – время обработки 480 с. Опустив перпендикуляр из точки пересечения во втором квадранте до линии объема дна ( $V_{дн} = 0,01 \text{ м}^3$ ), а затем параллельно проведя прямую, получаем производительность дражировщика по заданным параметрам 34,5 кг/ч (8,3 посевной единицы). Применение разработанной номограммы позволяет облегчить задачу при выборе параметров и режимов работы на семенах с разным коэффициентом изменения объема.

#### **5.4. Расчет экономической эффективности использования центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем**

Для определения экономической эффективности использования центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем были проведены исследования по определению стоимости обработки семян в сравнении с импортным серийно выпускаемым дражировщиком Petkus СТ-50.

При определении экономической эффективности применения новой техники основным критерием является годовой экономический эффект [55, 56, 70, 126].

Годовой экономический эффект от использования центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем определяли по зависимости

$$\text{Э} = Z_{пз1} - Z_{пз2} - V_{с2}, \quad (5.2)$$

где  $Z_{пз1}$  – приведенные затраты на получение 1 т дражированных семян в импортном дражировщике, тыс. рублей;

$Z_{пз2}$  – приведенные затраты на получение 1 т дражированных семян в центробежном дражировщике с лопастным отражателем, тыс. рублей;

$V_{с2}$  – годовой объем производства центробежного дражировщика с лопастным отражателем, т.

Приведенные затраты на получение 1 т дражированных семян в импортном дражираторе рассчитывали по выражению

$$Z_{\text{пз1}} = \frac{Z_{\text{з1}} K_1 E_n}{V_{\text{с1}}}, \quad (5.3)$$

где  $Z_{\text{з1}}$  – эксплуатационные годовые затраты в расчете на годовой объем производства дражированных семян в импортном дражираторе, тыс. рублей;

$K_1$  – капитальные вложения на покупку импортного дражиратора, тыс. рублей;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности сельскохозяйственной техники, принимается равным 0,15 [55];

$V_{\text{с1}}$  – годовой объем производства импортного дражиратора, т.

Приведенные затраты на получение 1 т дражированных семян в центробежном дражираторе с лопастным отражателем рассчитывали по следующему выражению:

$$Z_{\text{пз2}} = \frac{Z_{\text{з2}} K_2 E_n}{V_{\text{с2}}}, \quad (5.4)$$

где  $Z_{\text{з2}}$  – эксплуатационные годовые затраты в расчете на годовой объем производства дражированных семян в центробежном дражираторе с лопастным отражателем, тыс. рублей;

$K_2$  – сумма капиталовложений на изготовление центробежного дражиратора с лопастным отражателем, тыс. рублей.

Сумму капиталовложений на изготовление центробежного дражиратора семян с лопастным отражателем определяли как

$$K_2 = C_d P_{\text{тз}} Z_3 P_{\text{оп}} P_{\text{ох}}, \quad (5.5)$$

где  $C_d$  – стоимость деталей и покупных изделий, тыс. рублей;

$P_{\text{тз}}$  – транспортно-заготовительные расходы, тыс. рублей;

$Z_3$  – затраты на оплату труда при изготовлении деталей установки, тыс. рублей;

$P_{\text{оп}}$  – общепроизводственные расходы, тыс. рублей;

$P_{\text{ох}}$  – общехозяйственные расходы, тыс. рублей.

Стоимость деталей и покупных изделий  $C_d$  складывается из стоимости частотного преобразователя, электродвигателей, модуля подачи жидких и сухих компонентов, металла и других элементов, предназначенных для изготовления центробежного дражиратора. Полученные результаты сведены в табл. 5.3 [37, 54, 83, 84].

Таблица 5.3. Стоимость элементов центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем на 09.01.2014

Название элементов	Количество	Стоимость, тыс. рублей
Частотный преобразователь VFD015EL43A	1	3332,5
Насос-дозатор жидких компонентов НД-5	1	3282,4
Электродвигатель АИР80В4 1,5 кВт	1	870,5
Электродвигатель АИР71А2 0,75 кВт	1	690,2
Металл, капролон, подшипники и другие элементы	–	2200
Итого ...	–	10375,6

Транспортно-заготовительные расходы  $P_{\text{тз}}$  определяли в процентах от стоимости покупных материалов и изделий следующим образом [70]:

$$P_{\text{тз}} = C_{\text{д}} \cdot P_{\text{тз}}, \quad (5.6)$$

где  $P_{\text{тз}}$  – процент транспортно-заготовительных расходов, принимаем равным 5 %.

Затраты на оплату труда  $Z_3$  при изготовлении деталей установки определяли по формуле

$$Z_3 = OT_{\text{тар}} \cdot a_{\text{п}} \cdot O_{\text{доп}} \cdot O_{\text{отч}}, \quad (5.7)$$

где  $OT_{\text{тар}}$  – тарифная ставка оплаты труда, тыс. рублей;

$a_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда.

Принимаем равным 1,1 [78];

$O_{\text{доп}}$  – коэффициент, учитывающий размеры дополнительной оплаты труда. Принимаем равным 1,1 [36];

$O_{\text{отч}}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на все виды страхования. Принимаем равным 1,34 [68].

Тарифная ставка оплаты труда  $OT_{\text{тар}}$  зависит от трудоемкости работ и часовой тарифной ставки соответствующих разрядов персонала:

$$OT_{\text{тар}} = T_{\text{ем}} \cdot C_{\text{ч}}, \quad (5.8)$$

где  $T_{\text{ем}}$  – трудоемкость работ, необходимых для изготовления деталей установки, чел.-ч. Рассчитанная нами трудоемкость  $T_{\text{ем}}$  равна 60 чел.-ч;

$C_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка, соответствующая разряду рабочего, тыс. рублей. Часовая тарифная ставка рабочего 4-го разряда на 01.01.2014 равняется 23,3 тыс. руб/ч [69].

Общепроизводственные  $P_{оп}$  и общехозяйственные  $P_{ох}$  расходы определяли в процентах от основной зарплаты на изготовление установки по следующим формулам [70]:

$$P_{оп} = 3_z \cdot P_{оп} / 100, \quad (5.9)$$

$$P_{ох} = 3_z \cdot P_{ох} / 100, \quad (5.10)$$

где  $P_{оп}$  – процент общепроизводственных расходов. По данным предприятия равняется 10 %;

$P_{ох}$  – процент общехозяйственных расходов. По данным предприятия равняется 15 %.

Эксплуатационные годовые затраты в расчете на годовой объем производства дражированных семян представляют собой прямые текущие затраты, которые рассчитываются по формуле

$$Z_3 = Z_A + Z_p + Z_{эн} + Z_{пр}, \quad (5.11)$$

где  $Z$  – годовой фонд заработной платы, тыс. рублей;

$A$  – амортизационные отчисления, тыс. рублей;

$Z_p$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание, тыс. рублей;

$Z_{эн}$  – годовые затраты на электроэнергию, тыс. рублей;

$Z_{пр}$  – прочие затраты, тыс. рублей.

Годовой фонд заработной платы  $Z$  обслуживающего персонала рассчитывали по формуле

$$Z = T_{год} \cdot C_{ч} \cdot a_{п} \cdot O_{доп} \cdot O_{отч}, \quad (5.12)$$

где  $T_{год}$  – трудоемкость процесса дражирования семян, чел.-ч.

Амортизационные отчисления определяли по формуле

$$A = \frac{K \cdot H_a}{100}, \quad (5.13)$$

где  $H_a$  – норматив годовых амортизационных отчислений по оборудованию, который определяли по следующей зависимости:

$$H_a = \frac{100}{B}, \quad (5.14)$$

где  $B$  – нормативный срок службы установки, лет. Принимали равным 10 лет [106].

Затраты на ремонт и техническое обслуживание  $Z_p$  определяли по выражению [1026]:

$$Z_p = K \cdot H_p, \quad (5.15)$$

где  $H_p$  – норматив годовых отчислений на ремонт и техническое обслуживание, равен 10 %.

Затраты на потребленную электроэнергию определяли по формуле

$$З_{\text{эн}} \frac{V_c P C_{\text{эн}}}{Q_{\text{др}}}, \quad (5.16)$$

где  $V_c$  – годовой объем производства дражированных семян, т;  
 $P$  – мощность рассматриваемого оборудования, кВт. Принимаем равной 2,5 кВт;

$C_{\text{эн}}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, тыс. рублей. По данным предприятия на 01.01.2014 стоимость 1 кВт·ч электроэнергии равнялась 1,652 тыс. рублей;

$Q_{\text{др}}$  – производительность дражироватора, т/ч.

Прочие затраты рассчитывали по следующей формуле:

$$З_{\text{пр}} (0,05...0,11) (З_A З_p З_{\text{эн}}). \quad (5.17)$$

Срок окупаемости капитальных вложений определяли по следующей зависимости:

$$r = \frac{K}{\Theta}. \quad (5.18)$$

Результаты расчета экономической эффективности использования центробежного дражироватора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Техничко-экономические показатели эффективности использования центробежного дражироватора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем

Показатели	Обозначение	Варианты	
		разработанный	импортный
Сумма капиталовложений, тыс. рублей	К	13 727,7	342 434,4
Годовой объем производства дражироватора, т	$V_c$	15,5	40,5
Годовая наработка дражироватора, ч	–	450	450
Эксплуатационные затраты, тыс. рублей	$З_э$	23 739,5	100 169
Амортизационные отчисления, тыс. рублей	A	1372,8	34 243,4
Затраты на ремонт и техническое обслуживание, тыс. рублей	$З_p$	1372,8	34 243,4
Годовой фонд заработной платы, тыс. рублей	З	17 000,4	17 000,4
Годовые затраты на электроэнергию, тыс. рублей	$З_{\text{эн}}$	1835,5	5575,5
Прочие затраты, тыс. рублей	$З_{\text{пр}}$	2158,1	9106,3
Приведенные затраты на получение 1 т дражированных семян, тыс. руб/т	$З_{\text{пз}}$	1664,4	3741,6
Годовой экономический эффект, тыс. рублей	Э	32 196,6	
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	r	0,43	

Данные, приведенные в табл. 5.4, показывают, что годовой экономический эффект от применения центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем составляет 32 196,6 тыс. рублей (в ценах первого квартала 2014 г.).

### **Выводы**

1. Разработанный центробежный дражировщик семян сахарной свеклы с лопастным отражателем обеспечивает получение 98...99 % качественных дражированных семян сахарной свеклы, которые соответствуют требованиям ГОСТ 10882–98, при производительности 34,5 кг/ч (8,3 посевной единицы). После обработки дражированные семена отечественных сортов, полученные в условиях благоприятного климата, не уступают по своим показателям импортным аналогам.

2. Применение разработанной номограммы позволяет определить технологические параметры центробежного дражировщика с лопастным отражателем при разных коэффициентах изменения объема семян.

3. Годовой экономический эффект от использования центробежного дражировщика семян сахарной свеклы с лопастным отражателем составляет 32 196,6 тыс. рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована схема центробежного дражирователя семян сахарной свеклы периодического действия с вращающимся коническим дном, в камере смешивания которого эффективное взаимодействие семян с химическими компонентами реализуется за счет применения в ней лопастного отражателя и дискового распылителя.

2. Получены аналитические зависимости и предложены методики их расчета, описывающие движение семян по вращающемуся коническому дну, неподвижному цилиндрическому корпусу и лопастному отражателю, позволившие определить нижние границы изменения угловой скорости вращения дна – 10 рад/с, конусности дна – 40° (0,7 рад), а также связать конструктивные параметры камеры смешивания с технологическими параметрами процесса дражирования семян. Был определен рациональный угол наклона лопасти отражателя – 35° (0,61 рад).

3. Разработана методика инженерного расчета траектории движения капельного потока связующей жидкости при отрыве его от поверхности дискового распылителя. Анализ результатов расчета позволил обосновать высоту установки дискового распылителя в камере смешивания таким образом, чтобы его верхняя кромка располагалась на уровне нижнего основания лопастного отражателя.

4. В результате реализации многофакторного эксперимента получено уравнение регрессии, описывающее процесс дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражирователе с лопастным отражателем, позволяющее обосновать значения основных факторов, при которых достигается максимальное качество дражированных семян (99,5 %): угловая скорость вращения дна дражирователя – 27,6 рад/с; высота расположения лопастного отражателя – 0,03 м; коэффициент загрузки камеры смешивания – 0,36 (36 %); количество лопастей в отражателе – 12 шт.; время обработки семян – 472 с.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований реализованы в конструкции центробежного дражирователя семян сахарной свеклы с лопастным отражателем, который прошел производственные испытания в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция». Доля качественных дражированных семян, соответствующих действующим стандартам, составила 98...99 % при производительности дражирователя 34,5 кг/ч, а их полевая всхожесть – 97...98 %. Расчетный годовой экономический эффект составил 32 196,6 тыс. рублей (в ценах 2014 г.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдеев, Н. Е. Центробежные сепараторы для зерна / Н. Е. Авдеев. – М.: Колос, 1975. – 152 с.
2. Агромаш. Сельскохозяйственная техника [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://agromash36.ru/petkus.php>. – Дата доступа: 03.10.2011.
3. Анализ конструкций для дражирования семян сахарной свеклы / Н. П. Ларюшин, О. Н. Кухарев, И. Н. Семов, А. М. Чирков // *Аграрная наука – сельскому хозяйству*: сб. тр., посвящ. 90-летию Самарской ГСХА. – Самара: РИЦ ГСХА, 2010. – С. 144–149.
4. Андреева, Е. И. Биологическая активность и механизм действия системных фунгицидов / Е. И. Андреева, В. А. Зинченко. – М.: Изд-во МСХА, 1995. – 60 с.
5. Анцугай, Ф. И. Приближается весна – пора готовить семена / Ф. И. Анцугай // *Хозяин*. – 1999. – № 2. – С. 10–11.
6. Аппарат для дражирования семян: пат. 871752 СССР, МПК А 01С 1/06 / И. Я. Осташевский [и др.]; заявитель Головное специализ. констр. бюро для хим. защиты в растениеводстве. – № 2922505; заявл. 07.05.1980; опубл. 15.10.1981.
7. Аппарат для дражирования семян: пат. SU 1123562, МПК А 01С 1/06 / В. А. Усольцев, И. Г. Яковлев, А. М. Жердев, Н. И. Казачков. – № 3570214; заявитель и патентообладатель Киргиз. с.-х. ин-т им. К. И. Скрябина; заявл. 28.03.1983; опубл. 15.11.1984.
8. Барботирование семян [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.ponics.ru/2009/03/barb/>. – Дата доступа: 05.10.2011.
9. Бать, М. И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М. И. Бать, Г. Ю. Джанелидзе, А. С. Кельзон. – М.: Наука, 1990. – 503 с.
10. Бачило, Н. Г. Выявление эффективных защитно-стимулирующих смесей для инкрустирования семян льна / Н. Г. Бачило, Н. В. Степанова // *Земледелие и селекция в Беларуси: сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию»*. – Минск, 2008. – Вып. 44. – С. 83–92.
11. Болтенков, А. А. К обоснованию параметров дискового распылительного механизма в сушильных камерах / А. А. Болтенков // *Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та*. – 2005. – № 4(20). – С. 51–53.
12. Бондаренко, Н. Ф. Применение магнитных аппаратов в сельском хозяйстве / Н. Ф. Бондаренко // *Растениеводство*. – 1996. – № 10. – С. 5.
13. Бруй, И. Г. Особенности роста и развития зерновых культур после инкрустирования семян алкалоидсодержащими защитно-стимулирующими составами: материалы временных коллективов / И. Г. Бруй, Л. Ф. Кабашникова // *Роль адаптивной интенсификации земледелия в повышении эффективности аграрного производства: материалы Междунар. науч. конф. – Жодино, 1998. – Т. 2. – С. 157–159.*
14. Важный прием – намачивание семян [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.uafs.com.ua/soveti/vazhnyy-priem-namachivanie-semyan>. – Дата доступа: 05.10.2011.
15. Вибрационная машина непрерывного действия для дражирования семян сельскохозяйственных культур: пат. 2236105 Российская Федерация, МПК А 01С 1/06 / Ю. С. Колягин, В. Е. Шевченко, В. Я. Киселев; заявитель Воронежский гос. аграр. ун-т им. К. Д. Глинки. – № 2003109141/12; заявл. 31.03.2003; опубл. 20.09.2004.
16. Воднев, В. Т. Основные математические формулы: справочник / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович; под ред. Ю. С. Богданова. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 270 с.
17. Вольф, В. Г. Статистическая обработка опытных данных / В. Г. Вольф. – М.: Колос, 1966. – 255 с.
18. Вострухин, Н. П. Сахарная свекла / Н. П. Вострухин. – Минск: МФЦП, 2011. – 384 с.

19. Выращивание сахарной свеклы [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://farming.by/svekla>. – Дата доступа: 05.12.2012.

20. Галиуллин, Ш. Р. Установка нового поколения для многослойного инкрустирования семян / Ш. Р. Галиуллин // Сахарная свекла. – 2004. – № 9. – С. 34–36.

21. Гинзбург, А. С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М.: Колос, 1984. – 304 с.

22. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1972. – 358 с.

23. Голышин, Н. М. Фунгициды / Н. М. Гольшин. – М.: Колос, 1993. – 319 с.

24. Городецкая, Е. А. Электросепарация – высокоэффективный метод разделения семян и иных сыпучих смесей / Е. А. Городецкая, А. Е. Лагутина // Современная сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, применение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 26–28 мая 2010 г.): в 2 ч. / М-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 77–78.

25. Демьянчик, В. И. Инкрустирование семян защитно-стимулирующими смесями и его влияние на урожайность льнопродукции / В. И. Демьянчик // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / М-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет». – Гродно, 2010. – Т. 1: Агрономия. Экономика. Бухгалтерский учет. – С. 74–76.

26. Динамический коэффициент – трение / Большая Энциклопедия Нефти и Газа [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id115984p1.html>. – Дата доступа: 05.12.2014.

27. Диндорого, В. Г. Инкрустирование семян полевых культур и перспективы его внедрения в производство / В. Г. Диндорого, И. Г. Строна // Теория и практика предпосевной обработки семян. – Киев: Южное отд-ние ВАСХНИЛ, 1984. – С. 32–43.

28. Дrajировочная машина СВА-4а [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: [http://www.tsf2000.ru/draje\\_4a.html/](http://www.tsf2000.ru/draje_4a.html/). – Дата доступа: 18.03.2014.

29. Дrajиратор: пат. 7202 Респ. Беларусь, МПК А 01С 1 / В. С. Ветров, А. И. Николаенков, В. Ф. Вербицкий; заявитель Белорус. гос. аграр.-техн. ун-т. – № u 20100797; заявл. 22.09.2010; опубл. 30.04.2011 // Афицыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 151.

30. Дrajиратор: пат. 2195099 Российская Федерация, МПК А 01С1/06 / А. И. Зайцев, Б. А. Миронов, И. А. Зайцев, Е. И. Крогова, А. А. Мурашов, В. В. Бибииков, М. Ю. Гаршиц; заявитель и патентообладатель Ярослав. гос. техн. ун-т. – № 99124455/13; заявл. 22.11.1999; опубл. 27.12.2002.

31. Дrajиратор: пат. 2189713 Российская Федерация, МПК А 01С1/06 / Б. А. Миронов, И. А. Зайцев, А. А. Мурашов, А. И. Зайцев, Л. В. Королев, М. Ю. Гаршиц, Д. О. Быгеев; заявитель и патентообладатель Ярослав. гос. техн. ун-т. – № 2001103502/13; заявл. 02.05.2001; опубл. 27.09.2002.

32. Дrajирование семян сахарной свеклы [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.activestudy.info/drazhirovanie-semyan-saxarnoj-svekly/>. – Дата доступа: 18.03.2014.

33. Дrajировочный барабан ДР-51 [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.agroru.com/doska/drazhirovochnye-barabany-4058.htm>. – Дата доступа: 18.03.2014.

34. Дуктов, В. П. Эффективность инкрустирования семян льна-долгунца регуляторами роста растений / В. П. Дуктов, Н. Л. Даниленко, И. Н. Масленкина // Агроэкология: сб. науч. тр. / Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». – Горки, 2004. – Вып. 1: Проблемы сельскохозяйственной радиологии и пути их решения. – С. 54–56.

35. Дунский, В. Ф. Монодисперсные аэрозоли / В. Ф. Дунский, Н. В. Никитин, М. С. Соколов. – М.: Наука, 1975. – 188 с.
36. Закон Республики Беларусь от 29 июня 2006 г. № 138-З «О внесении дополнения в Трудовой кодекс Республики Беларусь» [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.vsavm.by/help5.doc>. – Дата доступа: 09.01.2014.
37. ЗАО «Вольна» // Частотный преобразователь [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://volnabel.pulscen.by/>. – Дата доступа: 10.01.2014.
38. Захаренко, В. А. Гербициды / В. А. Захаренко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 239 с.
39. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1967. – 372 с.
40. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 414 с.
41. Зинченко, В. А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность / В. А. Зинченко. – М.: КолосС, 2006. – 232 с.
42. Каскулов, М. Х. Дражирование – важный агроприем / М. Х. Каскулов, М. Х. Жиннов, А. М. Сохроков // Сел. механизатор. – 2002. – № 4. – С. 19–20.
43. Клочков, А. В. Механизация химической защиты растений: монография / А. В. Клочков, А. Е. Маркевич. – Горки: Белорус. гос. с.-х. акад., 2008. – 228 с.
44. Копытков, В. В. Технология получения дражированных семян с использованием композиционных полимеров / В. В. Копытков, Е. А. Калашникова // Лесной вестник. – 2015. – № 6. – С. 20–27.
45. Кротова, О. А. Предпосевная подготовка семян овощных культур / О. А. Кротова. – Тула, 1965. – С. 38.
46. Кубеев, Е. И. Новая технология дражирования семян / Е. И. Кубеев, В. М. Дринча // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – № 12. – С. 22–23.
47. Курзенков, С. В. Прогрессивные технологии и оборудование для дражирования семян / С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 21–22 октября 2015 г.): в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2015. – Т. 2. – С. 123–129.
48. Кухарев, О. Н. Теоретическое обоснование барабанного дражиратора с вращающимся дном / О. Н. Кухарев, Г. Е. Гришин, И. Н. Семов // Нива Поволжья. – 2013. – № 1. – С. 51–55.
49. Кухарев, О. Н. Экономическая эффективность семеноводства сахарной свеклы / О. Н. Кухарев // Вестн. ФГОУ ВПО «МГАУ им. В. П. Горячкина»: Экономика и организация производства в агропромышленном комплексе. – 2006. – № 4. – С. 89–90.
50. Линг, С. С. Физиологическое обоснование инкрустирования семян ячменя природными биологически активными веществами: автореф. дис. ... канд. биол. наук / С. С. Линг; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск, 1998. – 20 с.
51. Лукьянюк, Н. А. Эффективность применения дражирования семян сахарной свеклы против вредителей и болезней всходов / Н. А. Лукьянюк // Резервы повышения плодородия почв, эффективности удобрений и средств защиты растений: сб. науч. тр. / Белорус. с.-х. акад. – Горки, 1999. – С. 105–107.
52. Лукьянюк, Н. А. Эффективность протравителей инсектицидного и фунгицидного действия при дражировании семян / Н. А. Лукьянюк // Проблемы производства продукции растениеводства и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. юбил. конф., посвящ. 160-летию Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2000. – Ч. 2. – С. 92–95.
53. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
54. Металлообрабатывающее оборудование // Электродвигатели [Электронный ре-

сурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://shear.by/elektrovigateli>. – Дата доступа: 09.01.2014.

55. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений: учеб. пособие для вузов. – Киев: Урожай, 1986. – 118 с.

56. Методика экономической оценки сельскохозяйственной техники: учеб. пособие для вузов / Н. С. Власов [и др.]; под общ. ред. Н. С. Власова. – М.: Колос, 1979. – 399 с.

57. Механизация технологического процесса дражирования семян сахарной свеклы: монография / Н. П. Ларюшин, О. Н. Кухарев, И. Н. Семов, А. М. Чирков. – Пенза: ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА», 2012. – 102 с.

58. Миренков, Ю. А. Химические средства защиты растений: производств.-практ. издание / Ю. А. Миренков, П. А. Саскевич, С. В. Сорока. – Минск: Триолета, 2007. – 336 с.

59. Миренков, Ю. А. Химические средства защиты растений: справочник / Ю. А. Миренков, П. А. Саскевич, С. В. Сорока. – 2-е изд., перераб. и доп. – Несвиж: Несвижская типография им. С. Будного, 2011. – 394 с.

60. Митков, А. Л. Статистические методы в сельхозмашиностроении / А. Л. Митков, С. В. Кардашевский. – М.: Машиностроение, 1978. – 360 с.

61. Михеев, Д. А. Дражирование, как перспективный метод предпосевной обработки семян / Д. А. Михеев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 10–11 октября 2012 г.): в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 2. – С. 261–264.

62. Михеев, Д. А. Исследования нанесения жидких компонентов на поверхность семян с помощью дискового распылителя в камере смешивания дражирователя / Д. А. Михеев // Молодежь и инновации – 2015: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Горки, 27–29 мая 2015 г.): в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: П. А. Саскевич [и др.]. – Горки, 2015. – Ч. 2. – С. 243–245.

63. Михеев, Д. А. Перспективы предпосевной обработки семян / Д. А. Михеев // Молодежь и инновации – 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Горки, 29–30 мая 2013 г.): в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2013. – Ч. 2. – С. 16–18.

64. Михеев, Д. А. Способы дражирования семян / Д. А. Михеев // Молодежь и инновации – 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Горки, 29–30 мая 2013 г.): в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2013. – Ч. 2. – С. 19–21.

65. Мухин, В. Д. Дражирование семян сельскохозяйственных культур / В. Д. Мухин. – М.: Колос, 1971. – 95 с.

66. Мухин, В. Д. Подготовка семян овощных культур к посеву / В. Д. Мухин. – М.: Московский рабочий, 1979. – 136 с.

67. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002–89. – Введ. 01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – С. 32.

68. Налоговый кодекс Республики Беларусь (Особенная часть) от 29 декабря 2009 г. № 71-3 [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.lida-servis.by/files/10.doc>. – Дата доступа: 09.01.2014.

69. Национальный статистический комитет Республики Беларусь // Часовая тарифная ставка рабочих [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 09.01.2014.

70. Новиков, А. И. Эконометрика: учеб. пособие для вузов / А. И. Новиков. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 144 с.

71. Новицкий, Р. А. Защита растений от вредных организмов – важнейшее условие высокой продуктивности сельскохозяйственных культур / Р. А. Новицкий, А. В. Майсеенко // Белорусское сельское хозяйство. – 2006. – № 5. – С. 50–54.

72. Обработка семенного материала (протравливание семян) [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: [http://www.pesticidy.ru/dictionary/seed\\_treatment](http://www.pesticidy.ru/dictionary/seed_treatment). – Дата доступа: 09.01.2014.
73. Обработка семян – защита от болезней и гарантия урожая [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://biohim-bel.com/obrabotka-semyan>. – Дата доступа: 09.01.2012.
74. Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустанов. – М.: Химия, 1984. – 254 с.
75. Пневматический сортировальный стол ПСС-2,5 [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://7saw.ru/288-pnevmaticheskij-sortirovalnyj-stol-pss-25.html>. – Дата доступа: 03.10.2011.
76. Поверхностное натяжение [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/поверхностное\\_натяжение](https://ru.wikipedia.org/wiki/поверхностное_натяжение). – Дата доступа: 03.10.2012.
77. Позняк, С. Предпосевная подготовка семян – обязательный прием прогрессивной технологии возделывания сельскохозяйственных культур / С. Позняк // Сейбіт. – 2004. – № 2. – С. 16–18.
78. Постановление М-ва труда и соц. защиты Респ. Беларусь от 26 сентября 2003 г. № 106 «Об оплате труда работников Государственной инспекции охраны животного и растительного мира при Президенте Республики Беларусь» [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.pravoby.info/tema/mintruda/page20.htm>. – Дата доступа: 09.01.2014.
79. Постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 24 марта 2011 г. № 359 «О Государственной программе развития сахарной промышленности на 2011–2015 годы» / Законодательство Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm2/sovnm 402.htm>. – Дата доступа: 03.10.2012.
80. Предпосевная обработка семян сахарной свеклы [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.agroxxi.ru/saharnaja-sv-klja.html>. – Дата доступа: 02.03.2014.
81. Предпосевная обработка семян сахарной свеклы [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.activestudy.info/predposevnaya-podgotovka-semyan-saharnoj-svekly>. – Дата доступа: 02.03.2014.
82. Предпосевная подготовка семян и определение посевных качеств [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.sort-semena.ru/semana.html>. – Дата доступа: 02.03.2014.
83. Промышленные товары для бизнеса // Капролон [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://deal.by/Kaprolon;B.html>. – Дата доступа: 09.01.2014.
84. Промышленные товары для бизнеса // Насос-дозатор жидких компонентов НД-5 [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.remkom.by/>. – Дата доступа: 09.01.2014.
85. Протравливатели семян РЕТКУС СТ 50 [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.nestorexpo.com/belagro/index.pl?act=STAND&id=8209>. – Дата доступа: 18.03.2014.
86. Протравливатель СТ2-10 РЕТКУС [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://russian.petkus.de>. – Дата доступа: 18.03.2014.
87. Пурка литровая с падающим грузом модели ПХ-1М. Паспорт [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: [www.labvrn.ru/docs/Pasport%20purka.doc](http://www.labvrn.ru/docs/Pasport%20purka.doc). – Дата доступа: 02.03.2014.
88. Рожнов, А. В. Влияние экспозиции замачивания семян при дражировании на их посевные качества и урожай корнеплодов сахарной свеклы / А. В. Рожнов // Земляробства і ахова раслін. – 2010. – № 3. – С. 24–28.
89. Семена односемянной сахарной свеклы. Посевные качества. Технические условия: ГОСТ 10882–98. – Введ. 01.03.03. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 7 с.

90. Скарификация семян [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: [http://www.supersadovnik.ru/article\\_agro.aspx?id=1000880](http://www.supersadovnik.ru/article_agro.aspx?id=1000880). – Дата доступа: 05.10.2011.
91. Слизунок, Н. Н. Теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров дражирователя / Н. Н. Слизунок // Инновации молодых ученых аграрных вузов – агропромышленному комплексу Сибирского региона: материалы IX регион. науч.-практ. конф. молодых ученых вузов Сиб. федер. округа / Омский гос. аграр. ун-т. – Омск, 2011. – С. 81–83.
92. Смесьитель-дражирователь семян: пат. 2102849 Российская Федерация, МПК А01С1/06 / Д. А. Лачак, А. И. Зайцев, Д. О. Бытёв, А. А. Мурашов; заявитель и патенто-обладатель Ярослав. гос. техн. ун-т. – № 96117230; заявл. 27.08.1996; опубл. 27.01.1998.
93. Смирнов, П. М. Агрехимия / П. М. Смирнов, Э. А. Муравьин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
94. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960. – 244 с.
95. Сортировальный пневмостол СП-200 [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.by.all.biz/g106087/>. – Дата доступа: 03.10.2011.
96. Сортвые и посевные качества семян [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://agroazbuka.com/semena-posevnie-kachestva.html>. – Дата доступа: 02.10.2011.
97. Сохроков, А. М. Совершенствование технологии предпосевной подготовки семян овощных культур и оптимизация параметров установки для их дражирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. М. Сохроков. – Нальчик, 2002. – 129 с.
98. Степанова, Н. В. Влияние комплексного препарата ХОМ-К, применяемого для инкрустирования семян льна, на рост растений начальных этапов развития / Н. В. Степанова // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2006. – № 5. – С. 152–154.
99. Степук, Л. Я. Машины для применения средств химизации в земледелии: конструкция, расчет, регулировки: учеб. пособие / Л. Я. Степук, В. Н. Дашков, В. Р. Петровец. – Минск: Дикта, 2006. – 448 с.
100. Степук, Л. Я. Механизация процессов химизации в растениеводстве / Л. Я. Степук, И. В. Барановский. – Минск: БОИМ, 2003. – 242 с.
101. Степура, М. Ф. Подготовка семян овощных культур к посеву / М. Ф. Степура, Ф. И. Анцугай // Белорусское сельское хозяйство. – 2004. – № 1. – С. 28–33.
102. Строна, И. Г. Допосевная и предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур / И. Г. Строна // Теория и практика предпосевной обработки семян. – 1984. – № 1. – С. 5–16.
103. Тарасенко, А. П. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян / А. П. Тарасенко. – М.: КолосС, 2008. – 232 с.
104. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов / С. М. Тарг. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.
105. Тарушкин, В. И. Электросепарация – ресурсосберегающий метод получения высококачественных продуктов: материалы временных коллективов / В. И. Тарушкин, Е. А. Городецкая // Энергоресурсосберегающие технологии переработки сельскохозяйственного сырья: тезисы докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 1996. – Ч. 1. – С. 173–174.
106. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учеб. пособие / В. И. Черноиванов [и др.]; под общ. ред. В. И. Черноиванова. – 2-е изд. – Москва – Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.
107. Технические условия для дражирования семян овощных культур / Л. В. Павлов, О. Т. Параскова, В. Д. Мухин, Д. В. Жильцов // Картофель и овощи. – 2008. – № 2. – С. 23–24.
108. Устройство для дражирования семян: пат. 9732 Респ. Беларусь, МПК А 01С1/06 / Д. А. Михеев, С. В. Курзенков, А. В. Червяков; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. – № и 20130198; заявл. 01.03.13; опубл. 30.12.13 // Афицыйны бюл. / Нац. центр

інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 161.

109. Устройство для дражирования семян: пат. 9949 Респ. Беларусь, МПК А 01С1/06 / Д. А. Михеев, С. В. Курзенков, А. В. Червяков; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. – № и 20130197; заявл. 01.03.13; опубл. 28.02.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 145.

110. Устройство для дражирования семян: пат. 8750 Респ. Беларусь, МПК А 01С1/06 / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев, Р. В. Новиков, С. Л. Червякова, Е. А. Червякова; заявитель ООО «Научно-производственное предприятие «Белам плюс». – № и 20120165; заявл. 17.02.2012; опубл. 30.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 6. – С. 171.

111. Физические свойства воды [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html>. – Дата доступа: 04.10.2012.

112. Фрикционные свойства семян [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://sejalki.ru/articles/fizikotehnologicheskie-svoystva/friktsionnie-svoystva-semyan.html>. – Дата доступа: 04.10.2012.

113. Центрические напылительные машины – Cimbria [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.cimbria.ru>. – Дата доступа: 18.03.2014.

114. Червяков, А. В. Динамика движения капли связующей жидкости при ее отрыве с дискового распылителя в камере смешивания дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2013. – № 1. – С. 120–124.

115. Червяков, А. В. Динамика движения семенного материала по неподвижной цилиндрической части камеры дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 4. – С. 123–128.

116. Червяков, А. В. Изучение динамики движения семенного материала по вращающейся конической части камеры дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 2. – С. 131–137.

117. Червяков, А. В. Исследование движения семенного материала по лопасти отражателя центробежного дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2016. – № 3. – С. 132–134.

118. Червяков, А. В. Обоснование границ варьирования конусности и угловой скорости вращения днища камеры дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2014. – № 2. – С. 207–210.

119. Червяков, А. В. Обоснование границ варьирования параметров лопастного отражателя камеры смешивания центробежного дражиратора / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2016. – № 3. – С. 128–131.

120. Червяков, А. В. Обоснование интервалов варьирования факторов при дражировании семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с использованием лопастного отражателя / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С. 136–141.

121. Червяков, А. В. Повышение посевных качеств семенного материала методом дражирования / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 19–20 октября 2010 г.): в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 70–74.

122. Червяков, А. В. Производственные испытания центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с использованием лопастного отражателя / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2016. – № 1. – С. 107–112.

123. Червяков, А. В. Результаты экспериментальных исследований процесса дражирования семян сахарной свеклы в центробежном дражираторе с использованием ло-

пастного отражателя / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С. 146–150.

124. Червяков, А. В. Теоретические исследования движения семян по поверхности камеры смешивания центробежного дражирователя / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, Д. А. Михеев // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2011. – № 1. – С. 146–153.

125. Чирков, А. М. Повышение качества дражирования семян сахарной свеклы с обоснованием параметров дражирователя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. М. Чирков. – Пенза, 2010. – 173 с.

126. Шпилько, А. В. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драганцев, Н. М. Морозов; под ред. А. В. Шпилько. – М.: Высш. шк., 2001. – 346 с.

127. Электромагнитная семейчистительная машина [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.cnshb.ru/AKDIL/0024/base/R3>. – Дата доступа: 03.10.2011.

128. Яковлева, И. Г. Механизация изготовления и посева дражированных семян сельскохозяйственных культур / И. Г. Яковлева. – Фрунзе: Кыргызстан, 1971. – 76 с.

129. Epperlein, K. Effects of pelleting sugarbeet seed with GauchoReg (imidacloprid) on associated fauna in the agricultural ecosystem / K. Epperlein, H. Schmidt // Pflanzenschutz Nachrichten Bayer. – 2001. – № 54. – P. 369–398.

130. Hill, H. Recent developments in seed technology / H. Hill // Journal of New seeds. – 1999. – Vol. 1(1). – P. 105–112.

131. Kennedy, T. An evaluation of seed-pellet insecticides in a precision drilled crop of sugar beet / T. Kennedy, J. Connery // Irish Journal of Agricultural and Food Research. – 2006. – № 45. – P. 211–222.

132. Nedialkov, N. Analysis of influence of magnetic field to biological objects / N. Nedialkov, M. Mihov, G. Kapashikov // Селскостоп.Техн. – 2012. – Vol. 49, № 1. – P. 43–47.

133. Nedialkov, N. Experimental research of the magnetic field of a device for magnetic processing of agricultural materials / N. Nedialkov, M. Mihov, G. Kapashikov // Селскостоп.Техн. – 2012. – Vol. 49, № 1. – P. 37–42.

134. PETKUS Technologie GmbH [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: [http://petkus.foodset.ru/data/petkus/price\\_18-34-33.pdf](http://petkus.foodset.ru/data/petkus/price_18-34-33.pdf). – Дата доступа: 10.03.2012.

135. Philip Draycott, A. Sugar Beet / A. Philip Draycott // Formerly of Broom's Barn Research Station, Bury St Edmunds. – Suffolk, 2006. – 465 s.

136. Podlaski, C. The effect of parsley seed hydration treatment and pelleting on seed vigour / S. Podlaski, Z. Chrobak, Z. Wyszowska // Plant soil environ. – 2003. – № 49(3). – P. 114–118.

137. Sugar Beet Seed Processing [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: <http://www3.syngenta.com/country/uk/en/Crops/SugarBeet/Pages/SugarBeetSeedProcesing.aspx>. – Date of access: 02.12.2014.

138. The influence of seed coating on the vigor and early seedling growth of barley / F. M. F. Corlett [et al.] // Cien. Inv. Agr. – 2014. – № 41(1). – P. 129–136.

139. The Seed Biology Place [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: <http://www.seedbiology.de/seedtechnology.asp>. – Date of access: 05.12.2014.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А1

### Блок исходных данных и расчетный блок для расчета траектории движения семени по коническому дну

**Блок исходных данных**

$m := 0.000013$  - масса семени, кг;  
 $n := 150$  - частота вращения дна камеры дражирования, об/мин;  
 $\theta := \frac{58.22\pi}{180}$  - конусность дна камеры дражирования, рад;  
 $g := 9.81$  - ускорение свободного падения тела, м/с<sup>2</sup>  
 $r_{\text{дн}} := 0.085$  - нижний радиус днища камеры дражирования, м;  
 $H_{\text{дн}} := 0.107$  - высота днища камеры дражирования, м;  
 $f := 0.3$  - коэффициент трения семени о поверхность рабочего органа;

**Расчетный блок**

$\omega := \frac{n \cdot \pi}{30}$      $\omega = 15.71$  - угловая скорость дна камеры дражирования, с<sup>-1</sup>;  
 $\rho_0 := \frac{r_{\text{дн}}}{\sin(\theta)}$      $\rho_0 = 0.1$  - исходное положение семени на образующей дна камеры дражирования относительно начала координат, м;  
 $h_0 := \rho_0 \cdot \cos(\theta)$      $h_0 = 0.0527$  - исходное положение семени по вертикали относительно начала координат, м;  
 $R_{\text{дн}} := H_{\text{дн}} \cdot \tan(\theta) + r_{\text{дн}}$      $R_{\text{дн}} = 0.2577$ - верхний радиус дна камеры дражирования, м  
 $H_{\text{1дн}} := \rho_0 \cdot \cos(\theta) + H_{\text{дн}}$      $H_{\text{1дн}} = 0.1597$ - положение верхней кромки днища камеры дражирования относительно начала координат, м;

### Матрица решения системы дифференциальных уравнений

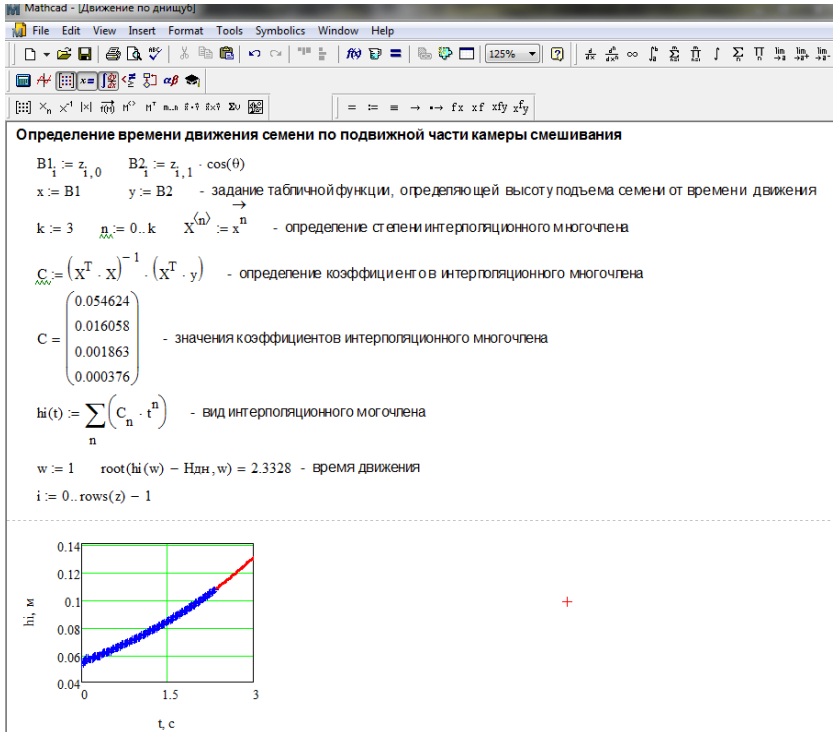
$$\dots \left( \dots \right)^2 \sin^2(\dots) g \cos(\dots) \frac{f + g \sin(\dots) \frac{1}{2} \left( \dots \right)^2 \sin(2 \dots)}{\sqrt{\dots \left( \dots \right) \sin(\dots) \left( \dots \right)^2}}$$

$$\dots \frac{2}{\dots} \left( \dots \right) \frac{f + g \sin(\dots) \frac{1}{2} \left( \dots \right)^2 \sin(2 \dots)}{\sqrt{\dots \left( \dots \right) \sin(\dots) \left( \dots \right)^2}} \left( \dots \right).$$

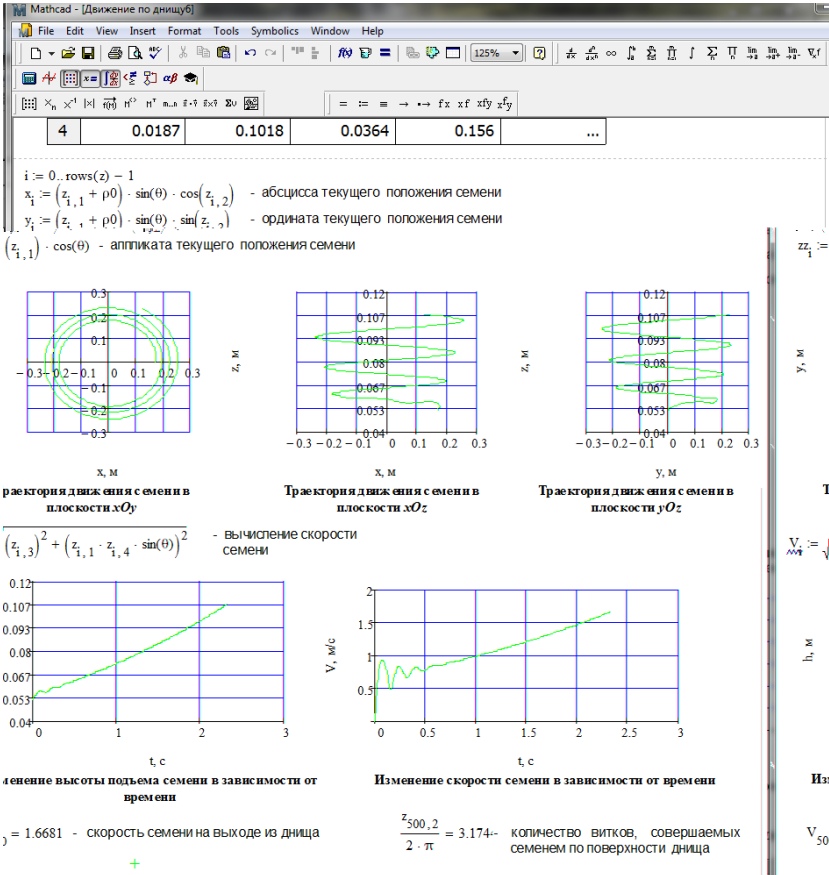
	время движения t	радиус-вектор точки	долгота точки	скорость радиус-вектора точки	скорость долготы точки
	0	1	2	3	4
z =	0	0.1	0	0	0
	0.0047	0.1001	$3.2135 \cdot 10^{-4}$	0.0578	0.3461
	0.0093	0.1005	0.0049	0.1055	1.7099
	0.014	0.1011	0.0168	0.1378	3.4082
	0.0187	0.1018	0.0364	0.156	...

- результаты решения системы ДУ;

**Блок определения времени достижения семенем верхней кромки  
вращающегося дна**



**Блок графического анализа движения семени по вращающемуся дну  
камеры смешивания с привязкой к прямоугольной декартовой  
системе координат**



**Блок исходных данных и расчетный блок для расчета траектории движения семени по цилиндрическому корпусу камеры смешивания**

Mathcad - [Движение по днищу (5)]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

**Блок исходных данных**

$m_s := 0.000001$  - масса семени, кг;  
 $n := 150$  - частота вращения дна камеры дражирования, об/мин;  
 $\theta := \frac{58.22\pi}{180}$  - конусность дна камеры дражирования, рад;  
 $g := 9.81$  - ускорение свободного падения тела, м/с<sup>2</sup>  
 $r_{\text{дн}} := 0.085$  - нижний радиус дна камеры дражирования, м;  
 $H_{\text{дн}} := 0.107$  - высота дна камеры дражирования, м;  
 $f := 0.3$  - коэффициент трения семени о поверхность рабочего органа;

**Расчетный блок**

$\omega := \frac{n \cdot \pi}{30}$      $\omega = 15.71$  - угловая скорость дна камеры дражирования, с<sup>-1</sup>;  
 $\rho_0 := \frac{r_{\text{дн}}}{\sin(\theta)}$      $\rho_0 = 0.1$  - исходное положение семени на образующей дна камеры дражирования относительно начала координат, м;  
 $h_0 := \rho_0 \cdot \cos(\theta)$      $h_0 = 0.0527$  - исходное положение семени по вертикали относительно начала координат, м;  
 $R_{\text{дн}} := H_{\text{дн}} \cdot \tan(\theta) + r_{\text{дн}}$      $R_{\text{дн}} = 0.2577$  - верхний радиус дна камеры дражирования, м  
 $H_{\text{дн}} := \rho_0 \cdot \cos(\theta) + H_{\text{дн}}$      $H_{\text{дн}} = 0.1597$  - положение верхней кромки дна камеры дражирования относительно начала координат, м;

**Блок постановка и численного решения системы ДУ, описывающей траекторию движения семени по цилиндрическому корпусу камеры смешивания**

$$Y := \begin{bmatrix} \arccos \left[ \frac{(z_{500,1} + \rho_0) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(z_{500,2})}{(z_{500,1} + \rho_0) \cdot \sin(\theta) + r_{\text{дн}}} \right] \\ (z_{500,1}) \cdot \cos(\theta) \\ z_{500,3} \\ z_{500,1} \cdot z_{500,4} \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{- определяются начальные условия;}$$

$$D(t, Y) := \begin{bmatrix} Y_2 \\ Y_3 \\ -\frac{R_{\text{дн}} \cdot f \cdot (Y_2)^3}{\sqrt{(R_{\text{дн}})^2 \cdot (Y_2)^2 + (Y_3)^2}} \\ -g - \frac{R_{\text{дн}} \cdot f \cdot (Y_2)^2 \cdot Y_3}{\sqrt{R_{\text{дн}}^2 \cdot (Y_2)^2 + (Y_3)^2}} \end{bmatrix} \quad \text{- определяется система ДУ;}$$

$m := \text{rkfixed}(Y, 0, 0.339, 500, D)$  - производится решение система ДУ;

	время движения	полярный и	аппликата а	изменение скорости полярного угла	изменение скорости аппликаты
	0	1	2	3	4
m =	0	1.2198	0.107	0.0585	1.6671
	1	6.78 · 10 <sup>-4</sup>	1.2198	0.1081	1.6604
	2	0.0014	1.2198	0.1092	0.0585
					...

$j := 0, 1, \dots, \text{rows}(m) - 1$      $z_{zz_j} := m_j, 2$  - определение высоты поднятия семени

**Блок графического анализа движения семени по цилиндрическому корпусу камеры смешивания с привязкой к прямоугольной декартовой системе координат**

Mathcad - [Движение по дну] (Y, 0, 0.34, 500, D) - производится решение система ДУ;

	время движения	полярный угол точки	аппликата точки	изменение скорости полярного угла	изменение скорости аппликаты
m =	0	0	1.2198	0.107	0.0585
	1	6.8·10 <sup>-4</sup>	1.2198	0.1081	0.0585
	2	0.0014	1.2198	0.1092	0.0585
					...

j := 0, 1..rows(m) - 1    zzz<sub>j</sub> := m<sub>j,2</sub> - определение высоты поднятия семени

$VV_j := \sqrt{\left[ \left( z_{500,1} \cdot \sin(\theta) + r_{дн} \right) \cdot m_{j,3} \right]^2 + \left( m_{j,4} \right)^2}$  - Вычисление скорости семени

z, м

t, с

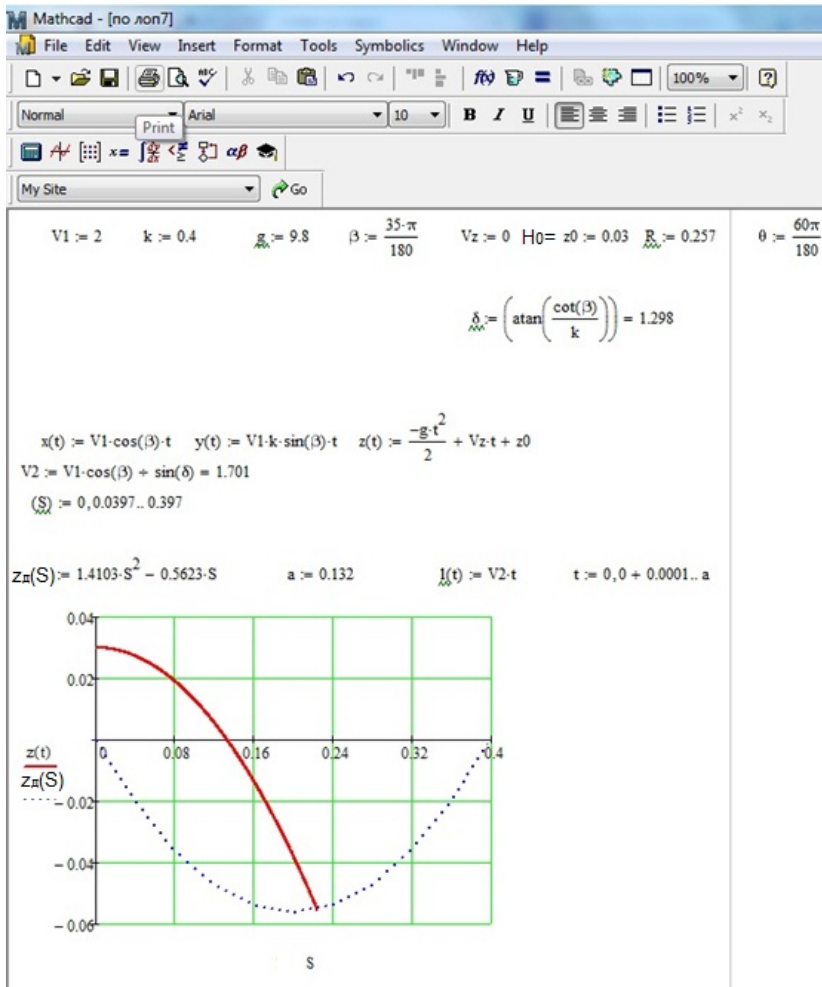
**Изменение высоты подъема семени в зависимости от времени**

V, м/с

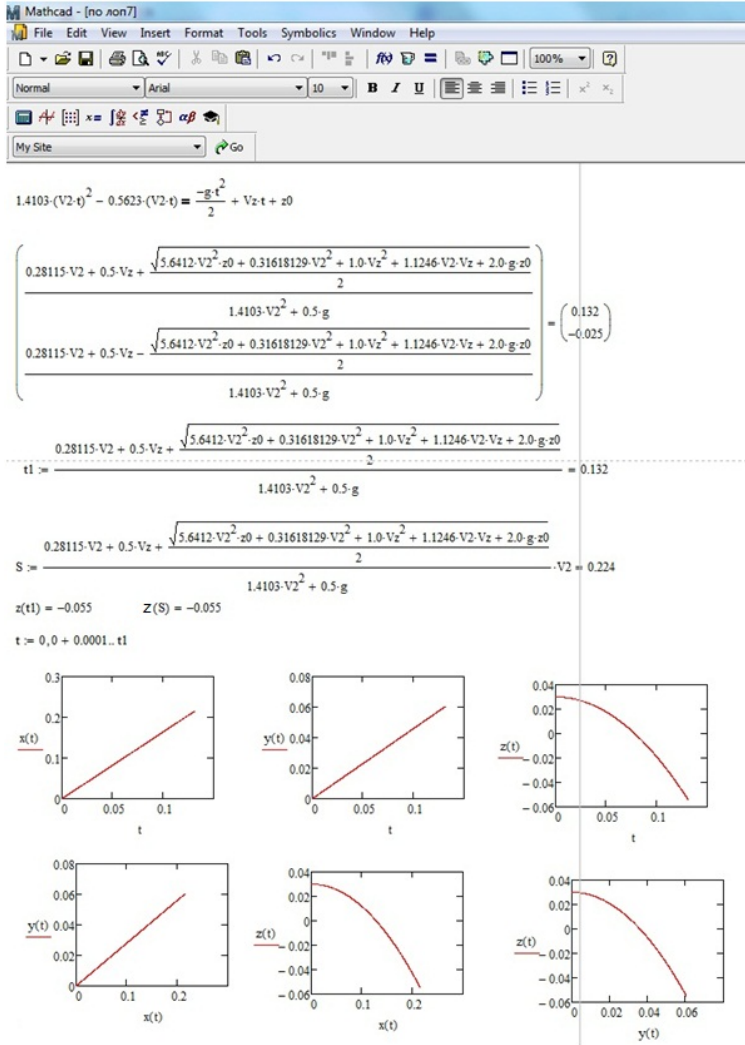
t, с

**Изменение скорости семени в зависимости от времени**

**Блок исходных данных для расчета траектории  
движения семени после отражения от лопасти отражателя**



**Блок расчета траектории движения семени после отражения от лопасти отражателя**



**Блок определения проекции скоростей капли связующего раствора  
жидкости при отрыве от поверхности дискового распылителя**

Mathcad - [расчет распылителя3]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

$$r := 0.1 \quad \omega := 314 \quad \nu := 1.004 \cdot 10^{-6} \quad Q := \frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{350} \quad Q = 0.00001$$

$$\sigma := 72.86 \cdot 10^{-3} \quad \rho := 1000 \quad \xi := 1.9 \quad H := 0.2 \quad g := 9.8$$

$$\Omega$$

$$\delta := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \nu \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \omega^2}} \quad \delta = 0.000017 \quad dk := 6 \cdot \left( \frac{\nu \cdot Q \cdot \sigma^3}{\rho^3 \cdot \omega^8 \cdot r^5} \right)^{\frac{1}{9}} \quad dk = 0.000326$$

$$V_{0x} := \left( \frac{3 \cdot r \cdot \omega^4 \cdot Q}{2 \pi \cdot \nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \delta - \frac{r \cdot \omega^2}{2 \cdot \nu} \cdot \delta^2 \quad V_{0x} = 1.4092$$

$$V_{0y} := r \cdot \omega \cdot \left[ 1 - \frac{Q \cdot \delta}{\pi \cdot \nu \cdot r^2} - \left( \frac{\omega^2 \cdot Q}{18 \cdot \pi \cdot \nu \cdot r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \delta^2 + \frac{\omega^2 \cdot \delta^4}{12 \cdot \nu^2} \right] \quad V_{0y} = 31.252$$

$$V_{0z} := \left[ \left( \frac{3 \cdot \omega^4 \cdot Q}{16 \cdot \pi \cdot \nu^2 \cdot r} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \delta^2 - \frac{\omega^2 \cdot \delta^3}{6 \cdot \nu} \right] \quad V_{0z} = 0.00015915$$

Матрица планирования X ПФЭ типа  $2^5$  в кодированном виде

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

## Значения результирующего фактора

Номер варианта	$D_{кc1}$	$D_{кc2}$	$D_{кc3}$	$D_{кc\text{ ср}}$
1	0,96	0,956	0,958	0,958
2	0,91	0,905	0,9	0,905
3	0,9	0,892	0,898	0,897
4	0,9	0,88	0,9	0,89
5	0,89	0,87	0,89	0,88
6	0,87	0,85	0,87	0,86
7	0,85	0,86	0,846	0,852
8	0,835	0,83	0,83	0,83
9	0,95	0,94	0,946	0,945
10	0,9	0,905	0,91	0,9
11	0,89	0,9	0,9	0,9
12	0,88	0,875	0,879	0,878
13	0,89	0,87	0,88	0,88
14	0,85	0,84	0,835	0,84
15	0,85	0,842	0,842	0,844
16	0,81	0,815	0,81	0,81
17	0,95	0,94	0,944	0,944
18	0,91	0,917	0,918	0,915
19	0,93	0,935	0,932	0,932
20	0,918	0,917	0,91	0,915
21	0,894	0,9	0,87	0,888
22	0,87	0,875	0,88	0,875
23	0,87	0,872	0,865	0,87
24	0,84	0,845	0,838	0,84
25	0,94	0,942	0,938	0,94
26	0,885	0,89	0,9	0,89
27	0,93	0,92	0,925	0,925
28	0,9	0,91	0,92	0,91
29	0,88	0,89	0,885	0,885
30	0,86	0,856	0,858	0,858
31	0,89	0,87	0,88	0,87
32	0,84	0,85	0,86	0,85

**Матрица планирования X для построения модели второго порядка**

1	30	0.4	12	0.06	900	0.16	144	360000	1.8	240	0.72	36
1	22.50	0.4	12	0.06	506.25	0.16	144	360000	1.35	240	0.72	36
1	30	0.3	12	0.06	900	0.09	144	360000	1.8	180	0.72	36
1	22.50	0.3	12	0.06	506.25	0.09	144	360000	1.35	180	0.72	36
1	30	0.4	9	0.06	900	0.16	81	360000	1.8	240	0.54	36
1	22.50	0.4	9	0.06	506.25	0.16	81	360000	1.35	240	0.54	36
1	30	0.3	9	0.06	900	0.09	81	360000	1.8	180	0.54	36
1	22.50	0.3	9	0.06	506.25	0.09	81	360000	1.35	180	0.54	36
1	30	0.4	12	0.03	900	0.16	144	360000	0.9	240	0.36	18
1	22.50	0.4	12	0.03	506.25	0.16	144	360000	0.675	240	0.36	18
1	30	0.3	12	0.03	900	0.09	144	360000	0.9	180	0.36	18
1	22.50	0.3	12	0.03	506.25	0.09	144	360000	0.675	180	0.36	18
1	30	0.4	9	0.03	900	0.16	81	360000	0.9	240	0.27	18
1	22.50	0.4	9	0.03	506.25	0.16	81	360000	0.675	240	0.27	18
1	30	0.3	9	0.03	900	0.09	81	360000	0.9	180	0.27	18
1	22.50	0.3	9	0.03	506.25	0.09	81	360000	0.675	180	0.27	18
1	30	0.4	12	0.06	900	0.16	144	160000	1.8	160	0.72	24
1	22.50	0.4	12	0.06	506.25	0.16	144	160000	1.35	160	0.72	24
1	30	0.3	12	0.06	900	0.09	144	160000	1.8	120	0.72	24
1	22.50	0.3	12	0.06	506.25	0.09	144	160000	1.35	120	0.72	24
1	30	0.4	9	0.06	900	0.16	81	160000	1.8	160	0.54	24
1	22.50	0.4	9	0.06	506.25	0.16	81	160000	1.35	160	0.54	24
1	30	0.3	9	0.06	900	0.09	81	160000	1.8	120	0.54	24
1	22.50	0.3	9	0.06	506.25	0.09	81	160000	1.35	120	0.54	24
1	30	0.4	12	0.03	900	0.16	144	160000	0.9	160	0.36	12
1	22.50	0.4	12	0.03	506.25	0.16	144	160000	0.675	160	0.36	12
1	30	0.3	12	0.03	900	0.09	144	160000	0.9	120	0.36	12
1	22.50	0.3	12	0.03	506.25	0.09	144	160000	0.675	120	0.36	12
1	30	0.4	9	0.03	900	0.16	81	160000	0.9	160	0.27	12
1	22.50	0.4	9	0.03	506.25	0.16	81	160000	0.675	160	0.27	12
1	30	0.3	9	0.03	900	0.09	81	160000	0.9	120	0.27	12
1	22.50	0.3	9	0.03	506.25	0.09	81	160000	0.675	120	0.27	12
1	30	0.35	10	0.045	900	0.1225	100	250000	1.35	175	0.45	23
1	22.50	0.35	10	0.045	506.25	0.1225	100	250000	1.0125	175	0.45	23
1	26.25	0.4	10	0.045	689.0625	0.16	100	250000	1.18125	200	0.45	23
1	26.25	0.3	10	0.045	689.0625	0.09	100	250000	1.18125	150	0.45	23
1	26.25	0.35	12	0.045	689.0625	0.1225	144	250000	1.18125	175	0.54	23
1	26.25	0.35	9	0.045	689.0625	0.1225	81	250000	1.18125	175	0.405	23
1	26.25	0.35	10	0.06	689.0625	0.1225	100	250000	1.575	175	0.6	30
1	26.25	0.35	10	0.03	689.0625	0.1225	100	250000	0.7875	175	0.3	15
1	26.25	0.35	10	0.045	689.0625	0.1225	100	360000	1.18125	210	0.45	27
1	26.25	0.35	10	0.045	689.0625	0.1225	100	160000	1.18125	140	0.45	18

## Значения результирующего фактора

Номер варианта	$D_{кc}$	Номер варианта	$D_{кc}$
1	0,971	22	0,945
2	0,968	23	0,94
3	0,947	24	0,936
4	0,943	25	0,978
5	0,967	26	0,962
6	0,96	27	0,97
7	0,942	28	0,96
8	0,934	29	0,96
9	0,981	30	0,945
10	0,967	31	0,958
11	0,956	32	0,94
12	0,942	33	0,98
13	0,963	34	0,972
14	0,945	35	0,98
15	0,94	36	0,97
16	0,92	37	0,987
17	0,954	38	0,973
18	0,952	39	0,984
19	0,942	40	0,99
20	0,944	41	0,982
21	0,948	42	0,98

### Оформление оптимизационной задачи на листе Excel

Кoeffициенты модели						
$b_0$		-0,753830014848094				
$b_1$		0,0442767475480457				
$b_2$		3,02304317688905				
$b_3$		0,103653623041649				
$b_4$		1,22686355780682				
$b_{11}$		-0,000773450653576221				
$b_{22}$		-4,75065992636622				
$b_{33}$		-0,00445793275109505				
$b_{55}$		-4,3826112728015E-07				
$b_{14}$		-0,0533333333333333				
$b_{25}$		0,000913072837252253				
$b_{34}$		-0,132413419913419				
$b_{45}$		0,00272700881512226				

Поиск оптимального решения					
Обозначения параметров	$\omega$	$\nu$	$K_{ог}$	$H_{ог}$	$f_{ог}$
Значения параметров					
Нижняя граница	22,5	0,3	9	0,03	400
Верхняя граница	30	0,4	12	0,06	600

Целевая функция =D2+D3\*C18+D4\*D18+D5\*E18+D6\*F18+D7\*C18^2+D8\*D18^2+D9\*E18^2+D10\*G18^2+D11\*C18

### Оформление параметров надстройки «Поиск решения»

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До:  Максимум  Минимум  Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

- $\$C\$18:\$G\$18 \leq \$C\$20:\$G\$20$
- $\$C\$18:\$G\$18 \geq \$C\$19:\$G\$19$
- $\$E\$18 = \text{целое}$
- $\$G\$18 = \text{целое}$

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения:

Метод решения  
Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Справка      Найти решение      Закрыть

## Результаты решения оптимизационной задачи (4.12)–(4.13)

	A	B	C	D	E	F	G
16		<b>Поиск оптимального решения</b>					
17		Обозначения параметров	$\omega$	$\nu$	$K_{от}$	$H_{от}$	$t_{об}$
18		Значения параметров	27,59	0,36	12	0,03	472
19		Нижняя граница	22,5	0,3	9	0,03	400
20		Верхняя граница	30	0,4	12	0,06	600
22		<b>Целевая функция</b>	<b>0,995</b>				

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	7
1.1. Актуальность предпосевной обработки семян сахарной свеклы .....	7
1.1.1. Семена как биологические объекты развития .....	9
1.2. Анализ существующих способов предпосевной обработки семян сахарной свеклы .....	10
1.3. Способы нанесения искусственных оболочек на поверхность семян .....	20
1.4. Машины и оборудование для создания питательных и защитных оболочек на семенах .....	23
1.5. Обоснование конструктивно-технологической схемы центробежного дражирователя .....	37
1.6. Обзор результатов исследований нанесения жидких компонентов с использованием дискового распылителя .....	40
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРАЖИРОВАНИЯ СЕМЯН В КАМЕРЕ СМЕШИВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДРАЖИРАТОРА ...	48
2.1. Этапы движения семени в камере смешивания .....	48
2.2. Определение геометрических параметров вращающегося дна центробежного дражирователя .....	49
2.3. Исследование движения семени по вращающемуся коническому дну камеры смешивания .....	51
2.4. Моделирование процесса движения семени по вращающемуся дну камеры смешивания .....	63
2.5. Исследование движения семени по неподвижной цилиндрической поверхности камеры смешивания .....	65
2.6. Моделирование процесса движения семени по корпусу центробежного дражирователя .....	70
2.7. Исследование движения семени при попадании на лопасть отражателя ...	71
2.8. Теоретическое обоснование конструктивных параметров лопастного отражателя .....	75
2.9. Моделирование полета семени после прохождения лопасти отражателя ...	80
2.10. Расчет капельного потока связующей жидкости в камере смешивания ...	83
2.11. Расчет сил адгезии связующей жидкости .....	87
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	91
3.1. Программа исследований .....	91
3.2. Методики изучения физико-механических свойств семян сахарной свеклы .....	92
3.2.1. Методики определения коэффициентов трения семян .....	94
3.2.2. Определение влажности и размерно-массовых характеристик семян .....	96
3.2.3. Определение коэффициента восстановления семян .....	99
3.3. Изучение свойств компонентов, наносимых на семена .....	100
3.4. Методика определения оптимального соотношения компонентов процесса дражирования .....	101

3.5. Методика определения количества и времени циклов обработки семян .....	102
3.6. Методика контроля качества дражированных семян сахарной свеклы .....	104
3.7. Методика экспериментальных исследований .....	105
3.7.1. Выбор и обоснование интервалов варьирования основных факторов .....	106
3.7.2. Методика проведения лабораторных исследований процесса дражирования .....	109
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	115
4.1. Свойства семян сахарной свеклы и наносимых на их поверхность химических компонентов .....	115
4.2. Результаты исследований взаимодействия связующей жидкости с семенами и сухим порошком .....	117
4.3. Результаты определения количества циклов обработки семян .....	118
4.4. Результаты однофакторных поисковых экспериментов .....	131
4.5. Оптимизация процесса дражирования семян .....	144
5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	144
5.1. Испытания центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем в ГСХУ «Горецкая сортоиспытательная станция» ...	147
5.2. Реализация результатов исследований .....	147
5.3. Методика расчета технологических параметров центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем .....	149
5.4. Расчет экономической эффективности использования центробежного дражиратора семян сахарной свеклы с лопастным отражателем .....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	156
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	164
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	

Научное издание

**Михеев** Денис Александрович

ДРАЖИРОВАНИЕ СЕМЯН САХАРНОЙ СВЕКЛЫ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ДРАЖИРАТОРОМ  
С ЛОПАСТНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Монография

Редактор *Н. А. Матасёва*

Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 19.10.2017. Формат 60 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 9,15.

Тираж 100 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.

Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.