

На правах рукописи

САВЕЛЬЕВ Алексей Викторович



**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ШАХТНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ПОЛНОЖИРНОЙ
ЭКСТРУДИРОВАННОЙ СОИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена на кафедре «Механизация животноводства» ФГБОУ ВПО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Фоминых Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Круглов Геннадий Александрович**,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
профессор кафедры
«Тепловодогазоснабжение сельского хозяйства» Челябинской государственной агроинженерной академии

Чумаков Владимир Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Тракторы
и сельскохозяйственные машины»
Курганской государственной
сельскохозяйственной академии
имени Т.С. Мальцева

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Оренбургский
государственный аграрный университет»

Защита состоится «22» марта 2012 г., в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Автореферат разослан «21» февраля 2012 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru> и сайте ФГБОУ ВПО ЧГАА <http://www.csaa.ru>.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Возмилов
Александр Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обеспеченность высококачественными комбикормами во многом определяет уровень развития и экономику животноводства и птицеводства, так как в структуре себестоимости продукции затраты на корма достигают 65...75%. В настоящее время дефицит протеина в рационе сельскохозяйственных животных и птиц достигает 20%. Для решения возникшей проблемы требуется увеличение производства культур с высоким содержанием белка. Уникальной по содержанию белка культурой является соя. Бобы сои содержат 35...40% белка, 17...20% жира, комплекс необходимых аминокислот, фосфатитов, углеводов и витаминов: А, В₁, В₂, В₁₂, С.

В полнорационных кормах целесообразно использовать сырьё, из которого не извлечены растительные масла. Разработана технология получения из соевых бобов полножирной экструдированной сои. Экструзия протекает менее 30 секунд, и за это время сырьё успевает пройти стадии измельчения, смешивания, тепловой обработки, обеззараживания, обезвоживания, стабилизации и увеличения объёма. После этого продукт необходимо быстро охладить. В результате анализа существующих технологических линий и технических средств для производства полножирной экструдированной сои выявлено, что существующие охладительные агрегаты для снижения температуры экструдата имеют ряд существенных недостатков, что отрицательно сказывается на производительности и в значительной степени снижает эффективность охлаждения. Главным образом это обусловлено несовершенством технологического процесса снижения температуры продукта в охладителе и конструкцией теплообменного аппарата.

В связи с этим вопросы исследования и установления закономерностей процесса охлаждения с целью определения рациональных значений технологических и конструктивных параметров наиболее производительных и перспективных шахтных охладителей являются актуальными.

Работа выполнена в соответствии с разделом федеральной программы по научному обеспечению АПК Российской Федерации: шифр 01.02 – «Разработать перспективную систему технологий и машин для производства продукции растениеводства и животноводства на период до 2015 г.».

Цель работы. Повышение эффективности охлаждения полножирной экструдированной сои посредством применения шахтного охладителя.

Исходя из поставленной цели, были сформулированы **задачи исследования:**

1. Определить термодинамические характеристики полножирной экструдированной сои.

2. Исследовать и установить закономерности изменения параметров процесса охлаждения слоя полножирной экструдированной сои продувкой воздухом в поперечном направлении.

3. Обосновать режим работы и конструктивные параметры шахтного охладителя.

4. Выбрать технологическую схему процесса охлаждения полножирной экструдированной сои и дать оценку эффективности производственной реализации результатов исследований.

Объект исследования. Процесс охлаждения полножирной экструдированной сои в шахтном охладителе.

Предмет исследования. Закономерности технологического процесса охлаждения полножирной экструдированной сои в шахтном охладителе; взаимосвязь между его конструктивными параметрами и свойствами продукта.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

– значения термодинамических характеристик полножирной экструдированной сои;

– закономерности, описывающие процесс охлаждения полножирной экструдированной сои в шахтном охладителе;

– методика расчёта передачи тепла от полножирной экструдированной сои окружающему воздуху в шахтном охладителе;

– режим работы и конструктивные параметры шахтного охладителя полножирной экструдированной сои;

– методика и средства проведения лабораторных исследований шахтного охладителя полножирной экструдированной сои;

– результаты экспериментальных исследований.

Практическая значимость работы и реализация ее результатов. Разработана методика расчета, позволяющая при проектировании и эксплуатации шахтных охладителей определять влияние

конструктивно-технологических параметров конструкции и температуры окружающего воздуха на степень охлаждения полножирной экструдированной сои. Разработана линия охлаждения полножирной экструдированной сои, защищенная патентами Российской Федерации. Шахтный охладитель полножирной экструдированной сои внедрен в технологическую линию цеха экструдирования сои ООО «НПК „БЕЛКОМ“» (г. Курган).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на научных конференциях в КГСХА и ЧГАА (2009–2011 гг.), а также на Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу (2010 г., СГАУ, г. Саратов), где на региональном этапе работа заняла первое место (2010 г., ЧГАА, г. Челябинск), и на Всероссийской выставке научно-технического творчества молодёжи (2010 г., ВВЦ, г. Москва). Работа выполнялась при поддержке гранта Правительства Курганской области в рамках конкурса «Инновационные проекты молодых изобретателей и рационализаторов».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии и приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 47 иллюстраций, 12 таблиц и 10 приложений. Список использованной литературы включает в себя 120 наименований, в том числе 4 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность темы, поставлена цель исследования, кратко излагаются основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика выполненных исследований.

В **первой главе** «Состояние вопроса развития производства кормов из сои, цель и задачи исследования» дана оценка значимости сои как источника белка, проанализированы области её использования,

а также выполнены обзор существующих технологий переработки соевых бобов и анализ научно-исследовательских работ по изучению процесса охлаждения сыпучих материалов.

Большой вклад в развитие кормоприготовления внесли В.И. Сыроватка, Л.П. Карташов, П.И. Леонтьев, С.В. Мельников, Н.С. Сергеев, И.Я. Федоренко, А.В. Фоминых и другие учёные. Научными основами процессов охлаждения и сушки сыпучего материала потоком воздуха, проходящим сквозь него, занимались М.Э. Аэров, Н.И. Гельперин, О.М. Тодес, С.С. Забродский, Г.С. Зелинский, А.Н. Плановский, В.А. Резчиков, В.Ф. Сорочинский и другие ученые.

Большинство научных исследований, посвященных охлаждению сыпучих материалов потоком окружающего воздуха, направлено на повышение степени и равномерности охлаждения слоя продукта и увеличение производительности теплообменного аппарата.

Основное преимущество применяемых в настоящее время охладителей барабанного типа – охлаждение при интенсивном перемешивании. Но при этом следует отметить некоторые недостатки охладителей: они не обеспечивают требуемый режим охлаждения; нет возможности регулирования влажности готового продукта; трудоёмкость очистки и обеззараживания оборудования (или такие операции даже не предусматриваются); наличие вращающихся частей большой массы; необходимость установки отдельного охладителя к каждому экструдеру, что приводит к высокой металлоёмкости, использованию большого количества приводов, большим энергозатратам и увеличению площади, занимаемой оборудованием.

С целью решения задачи по устранению данных недостатков сформулирована рабочая гипотеза: повышение эффективности охлаждения полножирной экструдированной сои возможно посредством применения шахтного охладителя с движением продукта сверху вниз и его продувкой воздухом в поперечном направлении. Данная схема обладает следующими преимуществами: жалюзийная конструкция боковых поверхностей позволяет добиться удобства мойки и дезинфекции охладителя; отсутствуют вращающиеся части большой массы; появляется возможность подачи продукта от нескольких экструдеров. Охлаждение продукта до нуж-

ной температуры и производительность шахтного теплообменного аппарата ограничиваются толщиной слоя охлаждаемого материала и скоростью движения воздуха сквозь слой из-за уноса мелких частиц продукта.

Во **второй** главе «Теоретические исследования процесса охлаждения полножирной экструдированной сои в шахтном охладителе» разработаны расчетная схема охладительного бункера (рисунок 1) и уточняющая методика расчёта теплообмена между частицами продукта и потоком охлаждающего воздуха.

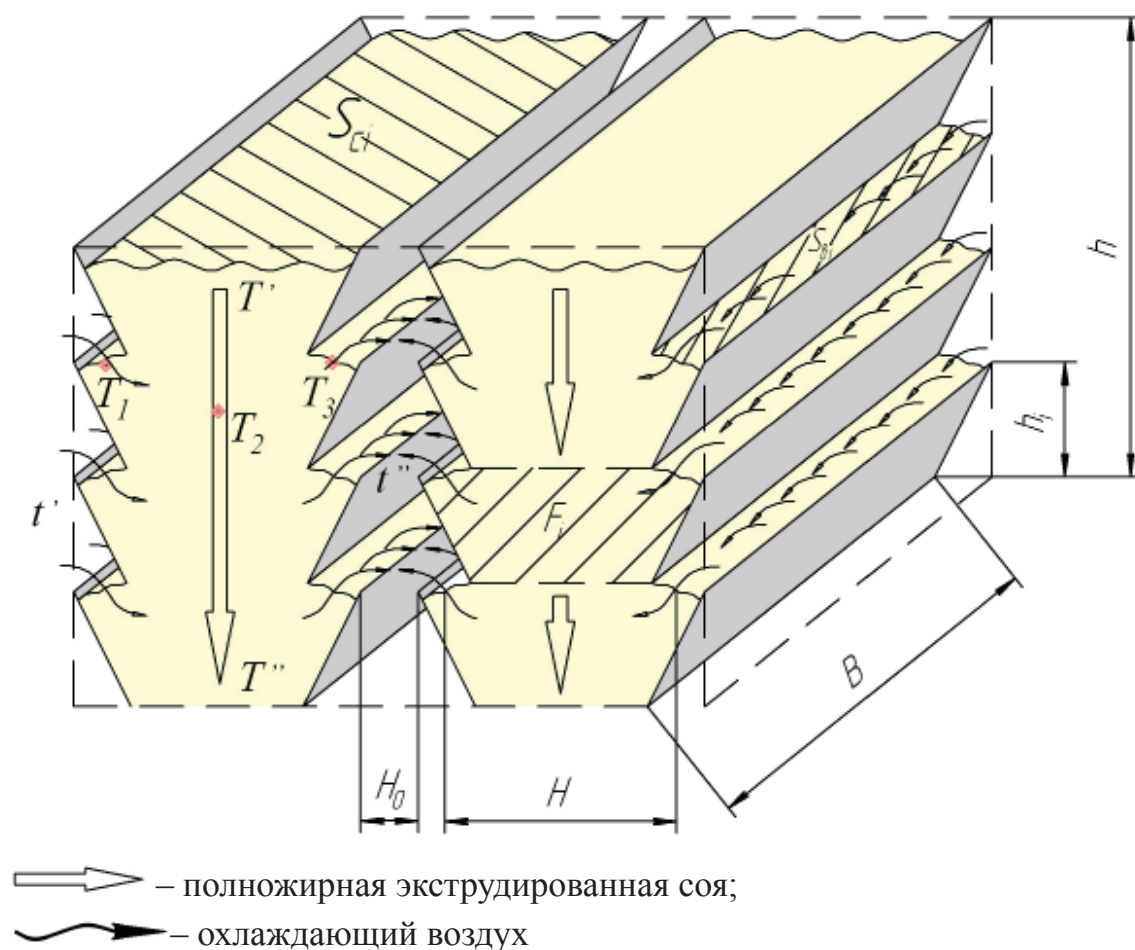


Рисунок 1 – Расчётная схема охлаждения слоя полножирной экструдированной сои продувкой воздухом в поперечном направлении

При расчётах приняты следующие допущения: скорость потока воздуха в секциях охлаждения неизменна; слой полножирной экструдированной сои считается стационарным; отвод теплоты от стенок охладителя не учитывается.

Зависимость объёмного расхода продукта Q_{vc} , м³/с, от габаритных размеров охлаждающего бункера (рисунок 1) и времени охлаждения продукта τ , с, выразится формулой

$$Q_{vc} = \frac{NBh}{\tau}, \quad (1)$$

где H – толщина (ширина) слоя полножирной экструдированной сои, м;
 B – длина секции охлаждения, м;
 h – высота охлаждающего бункера, м.

Процесс охлаждения продукта представляет собой конвективный теплообмен между твёрдыми частицами полножирной экструдированной сои и потоком воздуха. Он описывается уравнением

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha(T - t)F, \quad (2)$$

где $\frac{dQ}{d\tau}$ – тепловой поток, Дж/с;

F – площадь поверхности контакта, м²;

T – температура продукта, К;

t – температура воздуха, К;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Количество теплоты, отводимое от полножирной экструдированной сои, можно определить по уравнению

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где M – масса продукта, кг;

c – теплоёмкость продукта, Дж/(кг·К);

ΔT – изменение температуры продукта, К.

Преобразовав уравнение (2), получим

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha F}{cM}(T - t) = k(T - t). \quad (4)$$

Это дифференциальное уравнение можно решить методом разделения переменных при постоянном значении температуры окружающего воздуха $t = const$:

$$T(\tau) = Ce^{-k\tau} + t. \quad (5)$$

Для точек T_1, T_2, T_3 (рисунок 1) получим уравнения:

$$\begin{aligned} T_1(\tau) &= (T' - t)e^{-k\tau} + t, \\ T_2(\tau) &= \left(T' - \frac{2t + \Delta t}{2}\right) e^{-k\tau} + \frac{2t + \Delta t}{2}, \\ T_3(\tau) &= (T' - t - \Delta t) e^{-k\tau} + t + \Delta t, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δt – изменение температуры воздуха при его прохождении через слой продукта различной толщины, К.

Для определения коэффициента k , входящего в формулы (4, 6), необходимо установить значение коэффициента теплоотдачи α . В инженерной практике пользуются расчётными зависимостями, основанными на теории подобия. При малых размерах частиц и высокой их теплопроводности интенсивность теплообмена между частицами и обтекающим потоком воздуха можно определить по выражению, приведённому в трудах Н.И. Гельперина:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{Re}_{\text{ж}}}{\varepsilon} \right)^{1,5} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} \text{ при } \frac{\text{Re}_{\text{ж}}}{\varepsilon} < 200, \quad (7)$$

где $\text{Nu}_{\text{ж}} = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

$\text{Pr}_{\text{ж}} = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda}$ – критерий Прандтля;

ε – порозность слоя полножирной экструдированной сои.

Критерий Рейнольдса Re зависит от скорости воздушного потока, проходящего через слой продукта, и диаметра частиц. Критическая скорость для слоя частиц сферической формы определяется из уравнения

$$w_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{Ly_{\text{кр}} \mu_B \rho g}{\rho_B^2}}, \quad (8)$$

где $Ly_{\text{кр}}$ – критерий Лященко;

μ_B – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;

ρ и ρ_B – плотности частиц продукта и воздуха, кг/м³.

Для определения критерия Лященко $Ly_{кр}$ предварительно находим величину критерия Архимеда Ar :

$$Ar = \frac{d_{\text{э}}^3 \rho \rho_B g}{\mu_B^2}, \quad (9)$$

где $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр частиц продукта, м.

Расчёт критической скорости для слоя частиц исследуемого продукта выполнен по выражению (8) с введением в формулу коэффициента внутреннего трения полножирной экструдированной сои f_C . За единицу принят коэффициент внутреннего трения сухого песка средней размерной группы f_{II} . Тогда формула (8) принимает вид

$$w_{кр} = \frac{f_C}{f_{II}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Ly_{кр} \mu_B \rho g}{\rho_B^2}}. \quad (10)$$

Расчётное значение критической скорости для слоя частиц полножирной экструдированной сои составляет 0,434 м/с.

По результатам расчётов по формуле (6) построен график зависимости температуры центральной части слоя полножирной экструдированной сои от времени при различной его толщине (рисунок 2).

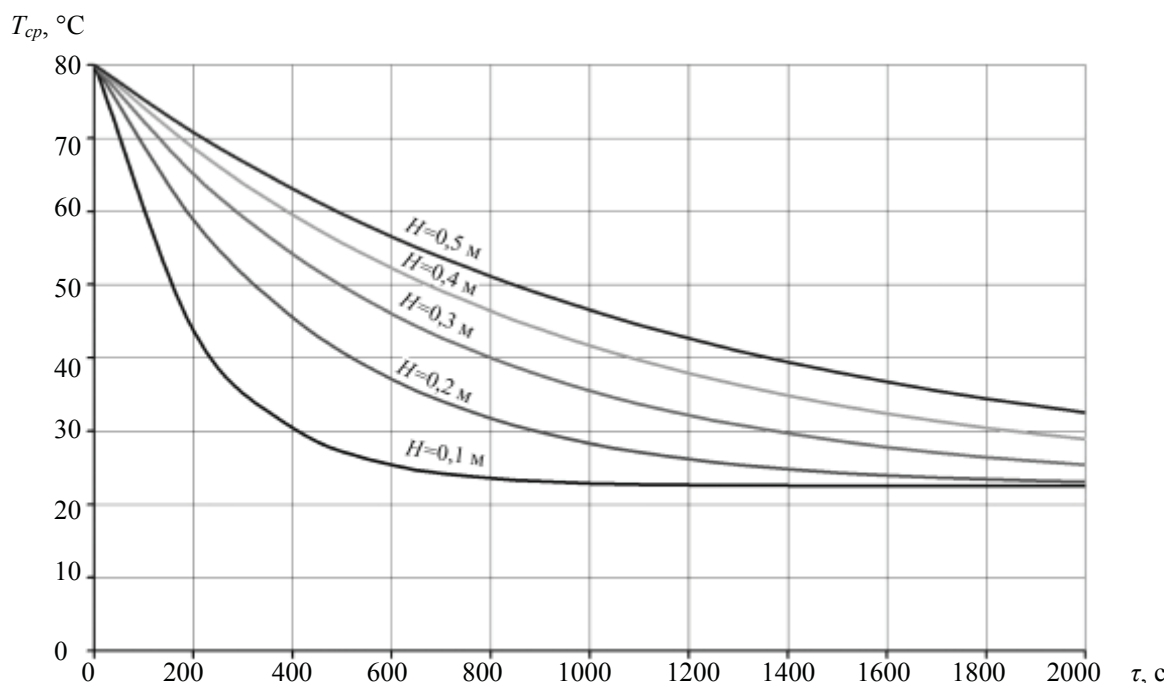


Рисунок 2 – Зависимость изменения температуры центральной части слоя продукта с течением времени при различной толщине слоя

Экструдат, в соответствии с техническими условиями, должен быть охлаждён до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 10 °С. Скорость охлаждения продукта может быть определена из выражения

$$v = \frac{T' - (t + 10)}{\tau}, \quad (11)$$

где T' – температура продукта, поступающего в охладитель, К.

В условиях умеренного климата температура в производственном помещении в зависимости от времени года может находиться в пределах от 6 до 35 °С. Подставив данные значения в формулу (11), предварительно определив время охлаждения, построили зависимость скорости изменения температуры от толщины слоя продукта и температуры окружающей среды (рисунок 3).

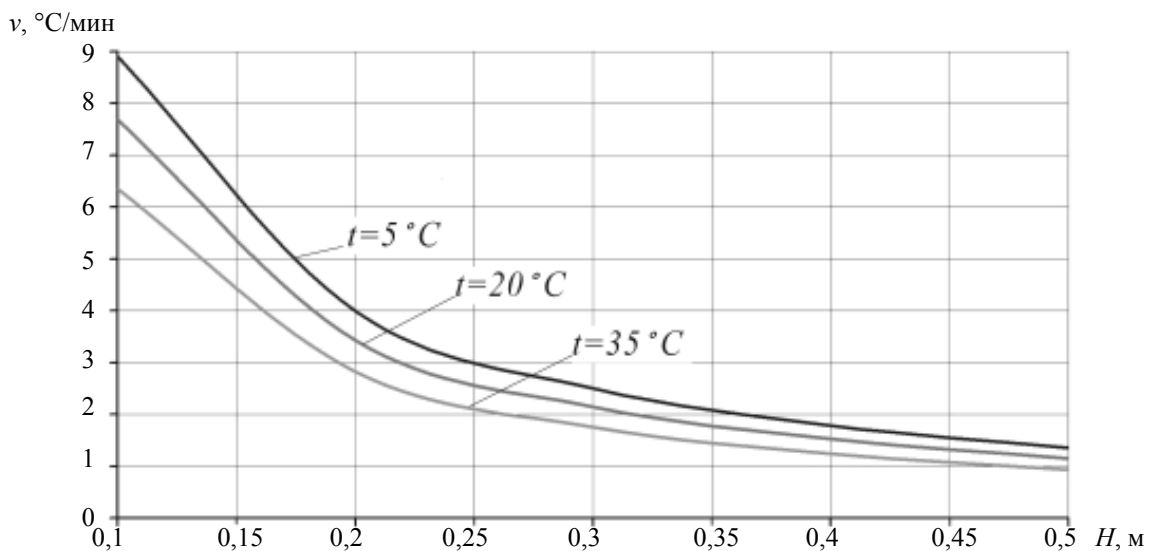


Рисунок 3 – Зависимость скорости охлаждения продукта от толщины слоя при различной температуре окружающего воздуха

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением толщины слоя продукта процесс охлаждения идёт менее интенсивно. Необходимая температура охлаждения при нормальных условиях достигается соответственно при толщине слоя 0,1 м за 6 минут, при 0,2 м – за 14,5 минуты, при 0,3 м – за 23,2 минуты, при 0,4 м – за 32,8 минуты. При толщине слоя 0,5 м продукт охлаждается до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 10 °С, более 40 минут.

Мощность потока воздуха, проходящего через слой продукта, находится по формуле

$$N = pQ_{V\phi}, \quad (12)$$

где p – давление воздуха, Па;

$Q_{V\phi}$ – объёмный расход воздуха, м³/с.

Расход воздуха, проходящего через секцию охлаждения, может быть найден по формуле

$$Q_{V\phi} = waB, \quad (13)$$

где w – скорость воздуха, м/с;

a – расстояние между жалюзи секции, м.

Величину a определяем из геометрических соотношений размеров секции охлаждения, а B находим из формулы (1). Объёмный расход воздуха с учётом количества секций определится уравнением

$$Q_{V\phi} = w(\operatorname{tg}(90 - \alpha) \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{Q_{Vc} \cdot \tau}{H \cdot i} \cdot (i - 1), \quad (14)$$

где i – количество секций в охладительном бункере;

α – угол наклона жалюзи секции охлаждения, град.

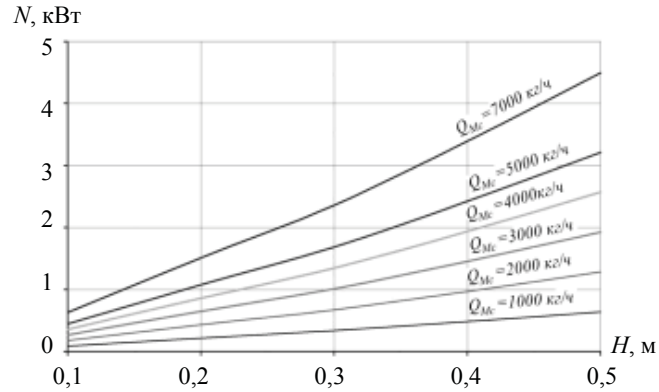
Затраты энергии на охлаждение 1 кг продукта определяются из соотношения

$$E_{y\phi} = \frac{N}{Q_{Mc}}, \quad (15)$$

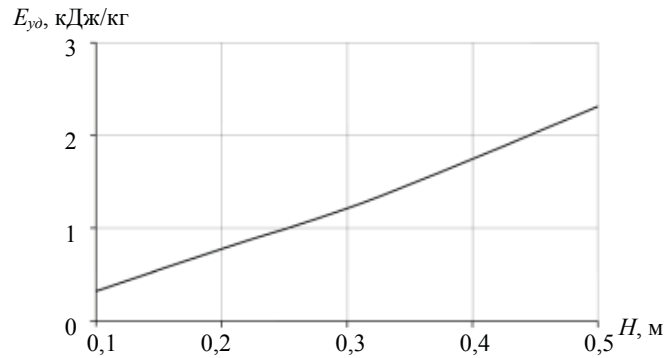
где Q_{Mc} – массовый расход полножирной экструдированной сои, кг/с.

В соответствии с проведёнными расчётами построены графики зависимостей мощности воздушного потока (рисунок 4 а) и удельных затрат энергии (рисунок 4 б) от толщины слоя продукта при различных объёмах поступающего в охладитель материала.

Толщина слоя более 0,4 м приводит к повышению затрат энергии на процесс охлаждения и продолжительному времени нахождения продукта в охладителе. При толщине слоя менее 0,2 м охладитель будет иметь большие габаритные размеры.



а



б

Рисунок 4 – Зависимости мощности воздушного потока при различных объёмах продукта, поступающего в охладитель (а), и удельных затрат энергии (б) от толщины слоя полножирной экструдированной сои

Таким образом, рациональная ширина секции охладителя полножирной экструдированной сои будет находиться в пределах от 0,2 до 0,4 м. При высоте охладительного бункера более 2 м, состоящего из 10...12 секций с размерами поперечного сечения от 0,2 до 0,4 м в ширину и от 1,5 до 2,5 м в длину, количество воздуха, необходимое для охлаждения 1 кг экструдированной сои, составит 1,1...1,8 м³, удельные затраты энергии будут 0,7...1,7 кДж/кг.

В **третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований»** приведены методики определения гранулометрического состава; критической скорости для слоя частиц; угла естественного откоса; насыпной плотности и плотности частиц, теплоёмкости и коэффициента теплопроводности полножирной экструдированной сои, а также методика проведения лабораторных и производственных исследований, в которой описываются опытная установка, приборы и оборудование.

Конструкция лабораторной установки представляет собой одну из секций шахтного охладителя полножирной экструдированной сои (рисунок 5). Установка состоит из секции для охлаждения 2, в которую засыпается исследуемый продукт 3. Передняя стенка секции охлаждения выполнена из прозрачного материала для визуального наблюдения за процессом продувки слоя продукта воздухом.

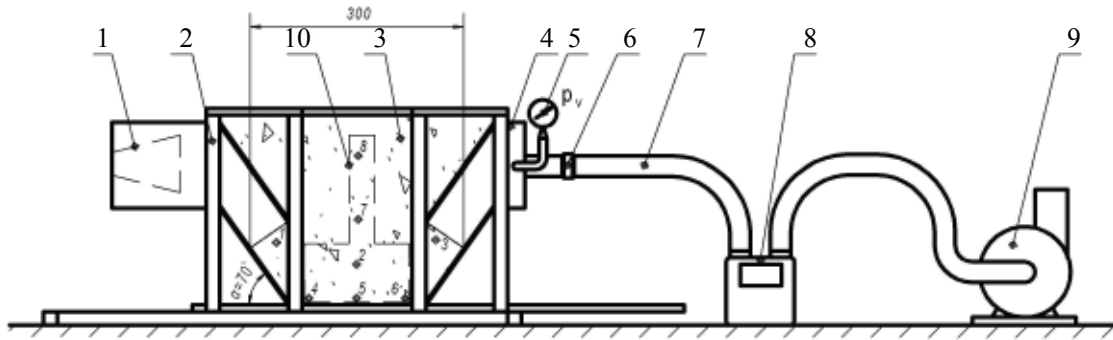


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки для определения параметров охлаждения полножирной экструдированной сои:

- 1 – нагреватель; 2 – секция для охлаждения; 3 – слой полножирной экструдированной сои; 4 – металлический короб; 5 – микроманометр; 6 – регулятор потока воздуха; 7 – трубопровод; 8 – расходомер воздуха; 9 – вентилятор; 10 – зона точек замеров температуры

Предварительный нагрев экструдированной сои осуществлялся двумя способами: путём продувки слоя материала горячим воздухом либо нагревом стенок секции охлаждения. Угол наклона жалюзи α секции охлаждения в соответствии с определённым углом естественного откоса и с учётом подверженности полножирной экструдированной сои слипанию принимаем равным 70° . К секции охлаждения присоединяется металлический короб 4 с трубкой, к которой подключен микроманометр 5 для измерения давления. Короб соединён трубопроводом с регулятором потока воздуха 6, расходомером воздуха 8 и вентилятором 9. Измерение температуры производится в характерных точках 10 на пути движения потока воздуха через слой продукта.

Установка позволяет регулировать толщину слоя исследуемого продукта от 0,2 до 0,5 м, менять скорость охлаждающего воздуха от 0,0 до 0,5 м/с, изменять начальную температуру продукта от 60 до 100 °С.

Исследования на установке проводились по следующей схеме: нагрев слоя продукта горячим воздухом и последующее его охлаждение потоком окружающего воздуха.

Проведён многофакторный эксперимент по определению зависимости степени охлаждения полножирной экструдированной сои и затрат энергии при прохождении воздуха через слой продукта от скорости охлаждающего воздуха и ширины секции.

На промышленно-экспериментальной линии по производству полножирной экструдированной сои ООО «НПК „БЕЛКОМ“» (г. Курган), изготовленной по предлагаемой технологии, проведены производственные испытания работы охладителя. Измерены показатели температуры и давления в характерных точках поточной линии экструдирования (рисунок 6).

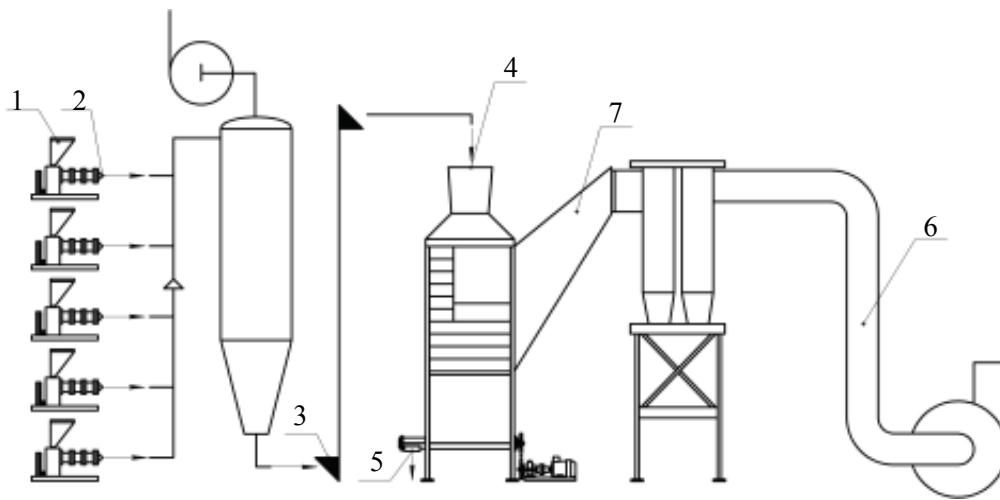


Рисунок 6 – Точки замера температуры по линии охлаждения полножирной экструдированной сои:

1 – бункер экструдера; 2 – выход из экструдера; 3 – вход в норию;
4 – приёмный бункер охладителя; 5 – выход из охладителя; 6, 7 – воздуховоды

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» представлены данные исследований, проведенных по методикам, изложенным в третьей главе.

При исследовании физико-механических свойств были определены гранулометрический состав, угол естественного откоса, критическая скорость для слоя частиц, насыпная плотность и плотность частиц, теплоемкость и теплопроводность полножирной экструдированной сои. Угол естественного откоса для полножирной экструдированной сои составил 35° . Средняя насыпная плотность полножирной экструдированной сои – 650 кг/м^3 , средняя плотность частиц – 1350 кг/м^3 . Установлено, что унос мелких частиц с поверхности

слоя полножирной экструдированной сои начинается при скорости воздуха $w = 0,5$ м/с. В ходе экспериментальных исследований по определению термодинамических характеристик полножирной экструдированной сои установлено, что теплоёмкость продукта равна 1808 ± 304 Дж/(кг·К), а среднее значение коэффициента теплопроводности – $0,223$ Вт/(м·К).

Результаты проведённых исследований прохождения воздуха через слой полножирной экструдированной сои и охлаждения слоя продукта проиллюстрированы на графиках (рисунок 7 а, б).

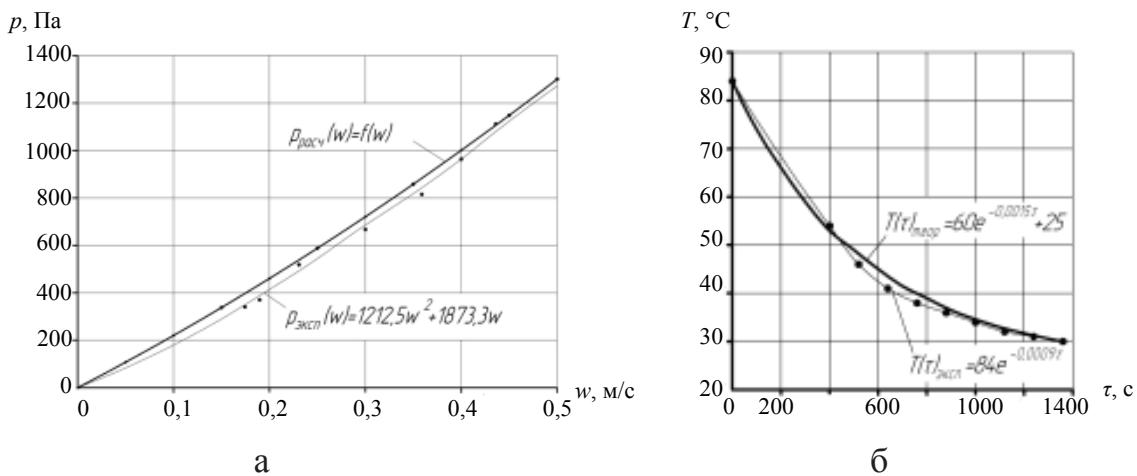


Рисунок 7 – Теоретические и экспериментальные зависимости давления на выходе из секции от скорости воздуха (а) и изменения температуры продукта в точке на глубине 10 мм от внешней поверхности от времени охлаждения при скорости воздуха 0,45 м/с (б) при ширине секции охлаждения 0,3 м

Математической обработкой результатов опытов продувки слоя полножирной экструдированной сои воздухом получена эмпирическая формула определения давления на выходе из секции при толщине слоя продукта 0,3 м:

$$p_{\text{экс}}(w) = 1212,5w^2 + 1873,3w. \quad (16)$$

Таким образом, при скорости воздуха 0,45 м/с температура продукта достигнет значения, не превышающего температуру окружающей среды на 10 °С, за 23 минуты.

В результате проведения многофакторного эксперимента и обработки полученных данных с помощью компьютерной программы

STATISTICA 6.1 получены математические зависимости времени снижения температуры и мощности воздушного потока от скорости воздуха и ширины секции охлаждения, которые представлены уравнениями регрессии, адекватно описывающими результаты опытов при пятипроцентном уровне значимости:

$$\tau = 7719 - 33593H + 72933H^2 - 7233w. \quad (17)$$

$$N = -2,27 + 7,17H + 16,45w^2. \quad (18)$$

Для анализа влияния факторов на процесс охлаждения продукта были построены поверхности откликов в трехмерном пространстве (рисунок 8 а, б).

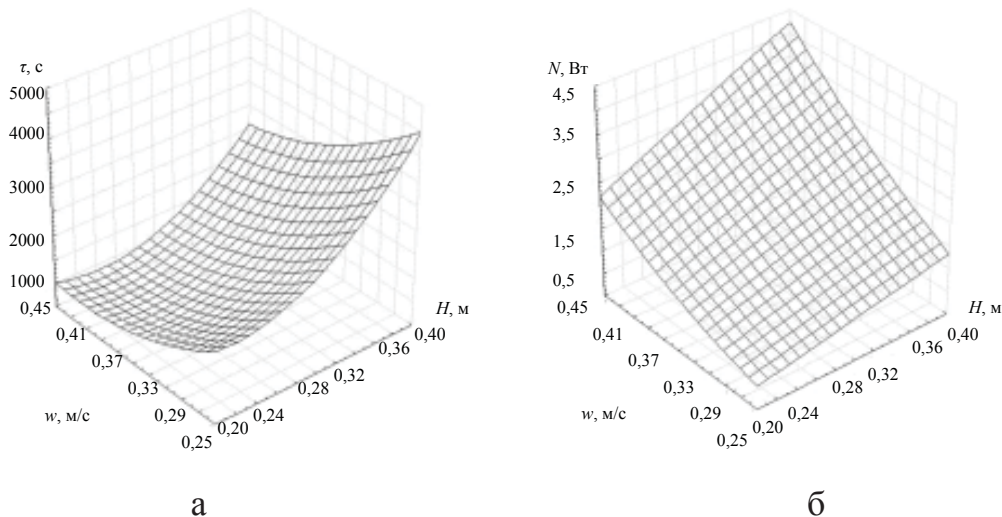


Рисунок 8 – Влияние ширины секции охлаждения и скорости воздуха на время снижения температуры продукта (а) и мощность воздушного потока (б)

На основании выявленных закономерностей можно сделать вывод, что увеличение толщины слоя экструдированной сои, подлежащей охлаждению, приводит к увеличению продолжительности нахождения продукта в охладителе и к росту энергозатрат на процесс снижения температуры продукта.

Результаты производственных экспериментов по измерению температуры в характерных точках линии охлаждения (рисунок б), которые проводились при работе двух экструдеров в зимний и летний периоды, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение температуры продукта и воздуха по линии охлаждения

Температура бобов в бункере экструдера	Температура экструдата	Температура экструдата после системы пневмотранспорта	Вход в охладитель		Выход из охладителя	
			Температура продукта	Температура воздуха	Температура продукта	Температура воздуха
<i>Зимний период года</i>						
4 °С	120 °С	63 °С	60 °С	6 °С	15 °С	11 °С
<i>Летний период года</i>						
27 °С	120 °С	93 °С	71 °С	29 °С	40 °С	35 °С

Произведены замеры температуры продукта по секциям охладительного бункера, общий вид которого представлен на рисунке 9 а.

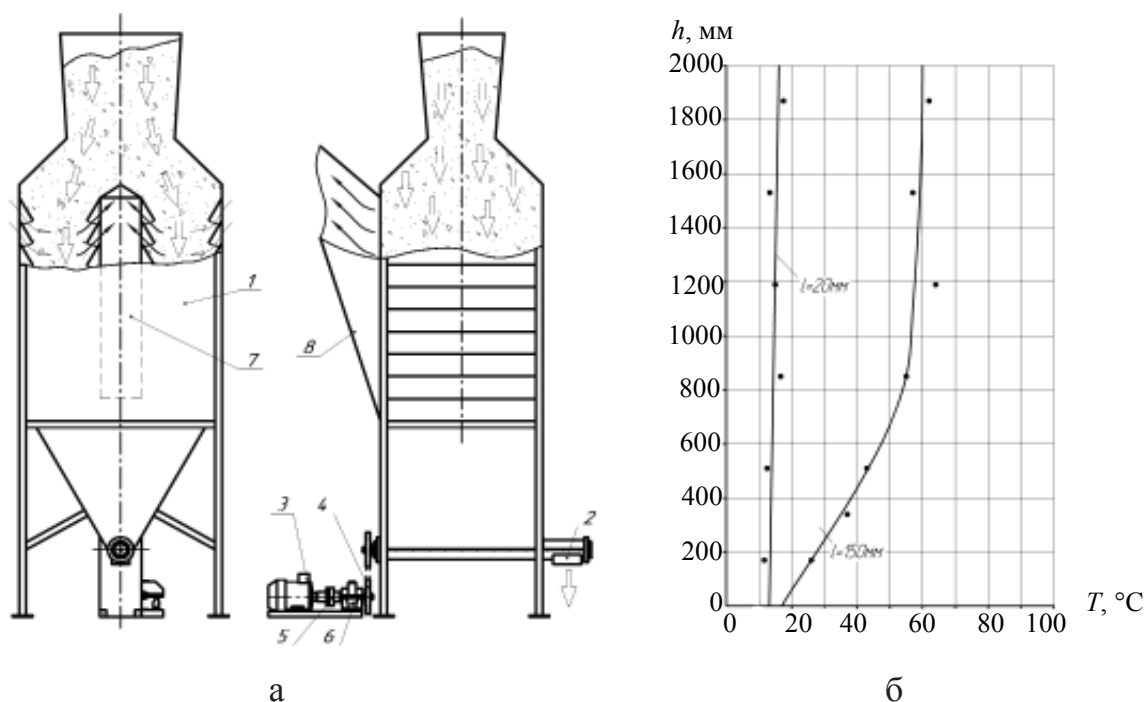


Рисунок 9 – Схема шахтного охладителя полножирной экструдированной сои (а) и распределение температур по высоте охладителя при погружении термометра на различную глубину (б):

- 1 – охладительный бункер; 2 – выгрузное окно; 3 – электродвигатель;
4 – цепная передача; 5 – муфта; 6 – редуктор; 7, 8 – воздуховоды

Измерения производились при работе двух экструдеров и температуре окружающего воздуха 6 °С. График снижения температуры полножирной экструдированной сои по высоте охладителя при различной глубине погружения термометра изображён на рисунке 9 б.

Из анализа данных производственных испытаний следует, что при использовании предлагаемого охладителя снижение температуры экструдата происходит интенсивно по всей высоте охладительного бункера. Температура воздуха при прохождении им слоя продукта увеличивается на 5...7 °С.

Расчет экономической эффективности при замене пяти охладителей барабанного типа «ОЕ-1000» на один шахтный охладитель показал, что разработанные технологические и технические решения дают экономию энергоресурсов 352 ГДж в год, при этом годовой эффект от внедрения составил 595 тыс. рублей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ существующих технологических схем и устройств для охлаждения полножирной экструдированной сои показал, что одним из перспективных путей повышения эффективности снижения температуры экструдата является использование шахтной схемы охладителя с поперечной продувкой слоя продукта окружающим воздухом. Недостатком, сдерживающим широкое применение данных устройств, является отсутствие согласования между количеством продукта, которое подлежит охлаждению, и конструктивно-технологическими параметрами теплообменного аппарата шахтной конструкции.

2. В ходе экспериментальных исследований по определению термодинамических характеристик полножирной экструдированной сои установлено, что теплоёмкость продукта составляет 1808 ± 304 Дж/(кг·К), среднее значение коэффициента теплопроводности – 0,223 Вт/(м·К).

3. Разработаны аналитические выражения, которые описывают процесс охлаждения полножирной экструдированной сои и позволяют исследовать влияние режима работы и конструктивных параметров шахтного охладителя на величину затрат энергии на снижение температуры продукта.

4. Использование выявленных зависимостей процесса охлаждения полножирной экструдированной сои позволило установить, что наиболее интенсивное снижение температуры продукта при отсутствии уноса его частиц происходит при скорости воздушного потока $w = 0,4 \dots 0,45$ м/с, а беспрепятственное прохождение экструдата через охладительные бункеры – при угле наклона жалюзи секции охлаждения $\alpha = 70 \dots 75^\circ$.

5. На основе аналитического выражения, связывающего количество подлежащего охлаждению продукта и конструктивно-технологические параметры шахтного охладителя, определено, что при массовом расходе продукта 5...7 т/ч их рациональные значения находятся в следующих пределах: ширина секции охлаждения $H = 0,2 \dots 0,4$ м, мощность воздушного потока $N = 1,8 \dots 2,5$ кВт.

6. Лабораторно-производственными исследованиями доказано, что использование шахтного охладителя с установленными значениями конструктивных и технологических параметров позволяет при нормальных атмосферных условиях охладить продукт с температуры 80 °С до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 10 °С, за 25...30 минут.

7. Установлено, что наиболее интенсивное охлаждение полножирной экструдированной сои обеспечивает линия, включающая в себя систему пневмотранспорта, норию с возможностью продувки воздухом и охладитель шахтного типа, позволяющая снижать температуру продукта при перемещении экструдата к охладителю.

8. Определено, что годовой экономический эффект от внедрения шахтного охладителя с поперечной продувкой слоя продукта воздухом в технологическую линию производства полножирной экструдированной сои, в которой работает пять экструдеров, составляет 595 тыс. рублей. Экономия прямых энергозатрат составляет 352 ГДж в год, срок окупаемости – 1 год 2 месяца.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Савельев, А. В. Определение рациональной скорости воздуха в охладителе полножирной экструдированной сои шахтного типа

[Текст] / А. В. Фоминых, Д. Н. Овчинников, А. В. Савельев // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 6(85). – С. 45–46.

2. Савельев, А. В. Охлаждение полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Фоминых, Д. Н. Овчинников, С. В. Алексеев, А. В. Савельев // Сельский механизатор. – 2011. – № 11. – С. 30–31.

3. Савельев, А. В. Методика расчёта конструктивных и технологических параметров шахтного охладителя полножирной экструдированной сои [Текст] / В. В. Бледных, А. В. Фоминых, А. В. Савельев // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 11. – С. 66–68.

Публикации в других изданиях

4. Савельев, А. В. Фильтрация воздуха через слой экструдированной сои [Текст] : в 2-х т. / А. В. Фоминых, А. В. Савельев // Инновационные пути решения проблем АПК: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 65-летию Курганской ГСХА. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2009. – Т. 2. – С. 379–382.

5. Савельев, А. В. Технология охлаждения экструдированной сои [Текст] / А. В. Савельев // Молодежный научный потенциал в инновационном развитии Уральского региона : Материалы региональной конференции молодых ученых, посвященной Году молодежи в России. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2009. – С. 172–174.

6. Савельев, А. В. Лабораторные исследования охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] / С. С. Родионов, В. А. Савельев, А. В. Савельев, Д. В. Ковшов // Материалы XLIX Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2010. – Ч. 2. – С. 34–39.

7. Савельев, А. В. Охлаждение сыпучего материала [Текст] / А. В. Савельев, Д. В. Ковшов // Актуальные проблемы современной науки : Материалы межрегиональной научно-практической конференции, посвящённой Дню науки. – Курган : Изд-во КГУ, 2010. – С. 43–44.

8. Савельев, А. В. Лабораторная установка для исследования условий охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] : в 2-х т. / А. В. Фоминых, А. В. Савельев // Проблемы модернизации АПК : Материалы Международной научно-практической конференции. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2010. – Т. 2. – С. 372–374.

9. Савельев, А. В. Определение конструктивных параметров охлаждающего аппарата [Текст] / А. В. Савельев // Вестник Курганского государственного университета. Сер. «Технические науки». – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – Вып. 5. – С. 12–13.

10. Савельев, А.В. Лабораторная установка для исследования условий охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Савельев // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодёжи. II Международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодёжи – путь к обществу, основанному на знаниях» : сборник научных докладов / Мос. Госстроит. ун-т. – М : МГСУ, 2010. – С. 272–274.

11. Савельев, А. В. Исследование процесса охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Фоминых, А. В. Савельев // Материалы I Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук, проф. Н. С. Сергеева. – Челябинск : ЧГАА, 2011. – Ч. III. – С. 97–102.

12. Савельев, А. В. Исследование процесса движения охлаждающего воздуха в теплообменном аппарате при производстве полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Фоминых, Д. Н. Овчинников, В. А. Савельев, А. В. Савельев // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Курган : РИЦ КГУ, 2011. – Т. 16. – № 3. – С. 96–99.

13. Савельев, А. В. Определение термодинамических характеристик полножирной экструдированной сои [Текст] : в 2-х т. / А. В. Фоминых, А. В. Савельев // Аграрная наука – основа инновационного развития АПК : Материалы Международной научно-практической конференции. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2011. – Т. 1. – С. 403–406.

Авторские свидетельства, патенты

14. Пат. на полезную модель № 93636 РФ, МПК А 23 № 17/00. Линия охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Фоминых, Д. Н. Овчинников, А. В. Савельев, Д. В. Ковшов. – № 2010100235/22 ; заявл. 10.01.2010 ; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.

15. Пат. на полезную модель № 108925 РФ, МПК А 23 № 17/00. Линия охлаждения полножирной экструдированной сои [Текст] / А. В. Фоминых, Д. Н. Овчинников, А. В. Савельев, Д. В. Ковшов, С. В. Алексеев. – № 2011117646 ; заявл. 03.05.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.

Подписано в печать 13.02.2012 г. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № КЗ-1

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Челябинская государственная агроинженерная академия»
454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75