

На правах рукописи



ЮХНИК Иван Петрович

**НАУКА И ПРАКТИКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ЕГО ПОДГОТОВКИ И
ПЕРЕРАБОТКИ В ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ**

Специальность:

05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Воронеж – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном казённом военном образовательном учреждении высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева»

- Научный руководитель – доктор технических наук
Романчиков Сергей Александрович
- Официальные оппоненты – **Фатыхов Юрий Адгамович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» заведующий кафедрой Пищевые и холодильные машины
Нестеров Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук
(АО «Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности»),
начальник отдела разработки новых технологий, оборудования и конструкторских работ
- Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань

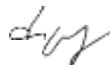
Защита состоится «11» марта 2021 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал. Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат размещен в сети Интернет на официальных сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «31» декабря 2020 г.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «18» декабря 2020 г.

Автореферат разослан «01» февраля 2021 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук
Д 212.035.01, проф.



Л. Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Продовольственная безопасность Российской Федерации, особенно в условиях экономических санкций, требует всестороннего развития производства продуктов питания, в том числе импортозамещающих. С этой целью Правительством РФ поставлена задача разработать технологии и приоритетные направления развития научно-технологического комплекса РФ на период до 2030 года. Одной из первоочередных мер – развитие технологий биоинженерии и рационального природопользования. Важным направлением в области развития пищевых производств является переработка зерновых.

На технологический процесс сохранения зерна оказывают влияние различные факторы: температура окружающей среды, относительная влажность, сорт зерна, качество зерна, температура зерна, температура сушки, техническое обслуживание и эксплуатация зернохранилищ. Себестоимость производимой продукции напрямую зависит от повышения эффективности работы устройств и сооружений для хранения сырья и затрат на электроэнергию при подсушке зерна.

В настоящее время остро стоит вопрос переработки некондиционного зерна, количество которого достигает не менее 5 % от объема, закладываемого на хранение. В промышленно развитых странах для рационального использования урожая зерновых, для различных отраслей промышленности, наряду с обычным крахмалом, производят крахмалы с измененными природными свойствами – модифицированные крахмалы. Их производство осуществляется за счет физических, химических и биохимических воздействий на исходный крахмал.

Научные и практические основы хранения зерна и его сушки представлены в работах В.А. Резчикова, Б.С. Сашина, В.Ф. Семенова, А.И. Стародубцевой, Л.А. Трисвятского и многих др. Вопросы активного вентилирования раскрыты в исследованиях В.Ф. Журавлева, Н.В. Цугленка, С.К. Манасяна, G.S. Mitall, Н.М. Lapp, J.S. Townsend и др. Проблемами глубокой биотехнологической переработки зерна, в том числе некондиционного, в разное время активно занимались А.И. Жушман, В.В. Литвяк, С.М. Юрштович, В.В. Бутрим, И.В. Потороко и др.

В целом, до настоящего времени, отсутствует не только единая теория, позволяющая системно во взаимосвязано учитывать все группы факторов эффективного использования зерновых, но и удовлетворительное модельное описание отдельных этапов подготовки и ресурсосберегающей переработки этого важнейшего вида

сельскохозяйственного сырья в пищевую продукцию. Необходимо отметить и недостаточность результатов исследований в области совершенствования технологического оборудования для переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

Цель работы: повышение эффективности сохранности зерна за счет модернизации систем активного вентилирования хранилищ и решения вопросов совершенствования оборудования для ресурсосберегающей переработки некондиционной части в пищевые продукты, в частности модифицированные крахмалы.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**.

1. Создать математическую модель процессов сушки зерна в установках бункерного типа для различных граничных условий.

2. Предложить методику идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами.

3. Разработать технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках.

4. Предложить устройства для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

5. Создать более совершенную конструкцию системы воздухораспределения.

6. Усовершенствовать методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок.

7. На основании полученных эмпирических моделей выработать практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения.

8. Разработать конструкции для хранения зерна и устройств для получения модифицированных крахмалов из некондиционного зерна.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель процессов сушки зерна в установках бункерного типа.

2. Предложена методика идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами.

3. Разработаны технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках.

4. Предложены конструктивные решения устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы.

Практическую значимость работы составляют:

1. Модернизированная конструкция системы воздухораспределения.
2. Методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок.
3. Практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ активного вентилирования для многоцелевого назначения.
4. Конструкции устройств для получения модифицированных крахмалов.

Реализация результатов исследований. Полученные результаты были приняты к внедрению в ООО «РАПС» (Региональном агентстве поддержки сельхозпроизводителей), (г. Екатеринбург, акт внедрения от 05 октября 2020 г.) и в учебно-методическом процессе ВАМТО им. генерала армии А.В. Хрулева (СПб, акт внедрения от 25 октября 2020 г.).

Апробация работы. Результаты исследований были обсуждены на Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 11–13 ноября 2019 г.); I Международной научно-практической конференция «Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции», (г. Саратов, 12–13 марта 2020 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует п. 1, 2, 3 и 4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 научных работ, в том числе одна статья в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus, шесть в изданиях рекомендованных ВАК РФ; один патент на изобретение и один патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 144 наименований, в том числе 20 зарубежных.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе представлены основные сведения о повышении ресурсосберегающей переработки зернового сырья в пищевую

продукцию; дан краткий анализ техники и технологии активного вентилирования зерна; рассмотрены особенности процесса активного вентилирования зерна; приведены конструкции оборудования для переработки некондиционного зерна. Сформулированы цель работы и определены задачи ее решения.

Во второй главе рассмотрены теоретические предпосылки регулирования тепло-массообменных процессов активного вентилирования зерна для обеспечения возможности использования его по прямому назначению – выпечки хлебобулочной продукции. С этой целью проведено математическое моделирование тепло-массообменных процессов сушки зерна. В рамках такого моделирования выполнен анализ характера особенностей теплообмена в дискретной насыпи пищевого продукта, а также исследованы особенности тепло- и массопереноса в насыпях пищевого сырья при наличии очагов самосогревания.

В первом случае изменение температуры в произвольный момент времени в любой точке греющего пласта толщиной $2R$ и окружающего его массива, имеющего свой тепловой фон, находили решением дифференциальных уравнений теплопроводности:

для пласта

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} \right) + q_u \quad (1)$$

для окружающего насыпного массива

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial z} \right) + q_0 \quad (2)$$

где τ – продолжительность процесса;

z – расстояние от средней плоскости греющего пласта;

ρ – плотность насыпного массива;

c – удельная насыпного массива;

λ – коэффициент теплопроводности насыпного массива;

t – температура в рассматриваемой точке насыпного массива;

q_0 – интенсивность тепловыделения (тепловой фон) насыпного массива, окружающего греющий пласт;

q_u – интенсивность тепловыделения греющего пласта повышенной физиологической активности.

Индекс 1 относится к греющему пласту, индекс 2 – к окружающей среде.

Система уравнений (1) – (2) решена на основе принципа суперпозиции при следующих упрощающих предпосылках. Температура греющего пласта в начальный момент времени одинакова по всему объему и равна $\int_1(x, o) = t_o$, а в окружающем пласт зерновом массиве равна $\int_2(x, o) = t_c$; рассматривается зерновая насыпь достаточно больших размеров (неограниченная пластина); тепловое взаимодействие между очагом самосогревания и окружающим массивом происходит по закону теплопроводности; интенсивность тепловыделения пласта q_u и окружающего массива q_0 постоянны во времени; теплофизические характеристики зерна в пласте и массиве приняты постоянными, но в общем случае отличными друг от друга.

Получено решение задачи с соответствующими краевыми условиями в предположении $t_o = t_c$ для греющего пласта

$$t_1(z_1, \tau) - t_o = \frac{\left(q_u - q_0 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1} \right) \tau}{\rho_1 c_1} \left(1 - \frac{4}{1 + k_c} F_1 \right) + \frac{q_0 \tau}{\rho_2 c_2}, \quad (3)$$

где через F_1 обозначена сумма

$$F_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} \left[er \int c \frac{(2n-1) - \frac{z}{R}}{2\sqrt{Fo_1}} + er \int c \frac{(2n-1) + \frac{z}{R}}{2\sqrt{Fo_1}} \right] \quad (4)$$

для насыпного массива

$$t_2(z_1, \tau) - t_o = \frac{\left(q_u - q_0 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right) \tau}{\rho_1 c_1} \frac{4k_c}{1 + k_c} \times \left(-er \int c \frac{\frac{z}{R} - 1}{2\sqrt{Fo_2}} - \frac{2}{1 + k_c} F_2 \right) + \frac{q_0 \tau}{\rho_2 c_2} \quad (5)$$

где

$$F_2 = \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} (-1) er \int c \frac{2nk_0^{-\frac{1}{2}} + \frac{z}{R} - 1}{2\sqrt{Fo_2}} \quad (6)$$

В записанных уравнениях a – коэффициент температуропроводности насыпного массива;

$$k_c = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sqrt{\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2}} - \text{критерий теплоусвоения};$$

$h = \frac{1 - k_c}{1 + k_c}$; $k_a = \frac{a_1}{a_2}$ – критерий, характеризующий теплоинерционные

свойства среды относительно пластины;

$Fo_1 = \frac{a_1 \tau}{R^2}$ и $Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{R^2}$ – числа Фурье соответственно для пластины и среды;

$$er \int cx = 1 - er \int x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-x^2) dx, \quad (7)$$

где $er \int cx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$ – функция ошибок Гаусса

Из решения (3), (4) получены частные упрощенные случаи. Экспериментальная проверка для зерна влажностью $W=20-22\%$ для пласта самосогревания и $W=13-14\%$ для насыпного массива подтвердила справедливость полученных зависимостей (рисунок 1).

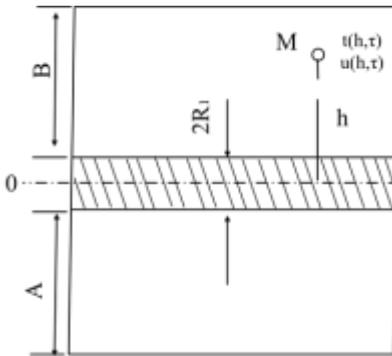


Рисунок 1 – Графическая интерпретация начальных условий: A, B – расстояние от основания емкости для хранения; 2R1 – толщина греющего пласта; h – расстояние от центра греющего пласта. Во втором случае рассмотрена модель аналитического уточнения режимов тепло-массопереноса в условиях близких к реально

реализуемым вариантам хранения большинства видов зерновых, предназначенных для переработки в пищевых целях. Органолептические методы, распространенные в пищевой промышленности, в частности при оценке качества сельскохозяйственного сырья, после его хранения, часто приводят к значительным потерям, которые должны быть отправлены на дополнительную переработку. Это требует более точного расчетного представления о влиянии режимов, контролируемых приборами, установленными в соответствующих хранилищах, для компенсации нежелательных изменений под действием биологических процессов происходящих в насыпях пищевого сырья. С этой целью рассмотрен

один из вариантов решения задачи о хранения насыпей пищевого сырья в цилиндрических силосах с влаготеплоизолированными боковыми и влагоизолированными торцевыми поверхностями, где на границах слоя с окружающей средой температура изменяется в соответствии с изменением температуры атмосферного воздуха. Аналитически решение соответствующей краевой задачи осуществляли методом интегрального преобразования Лапласа. Полученные аналитические решения удобны для инженерных расчетов и могут быть применены для более точного определения температуры в каждый момент процесса хранения в любой точке насыпи, что позволяет своевременно принимать меры средствами применяемой автоматики.

По полученным решениям произведен расчет распределения температуры по высоте насыпи пищевого сырья. Для высоты элеватора силосного типа $H=9\text{ м}$ и выбранных теплофизических характеристик получены следующие результаты:

$$h = 0.4H; \quad 1) \Delta h = 1\text{ м}; \quad 2) \Delta h = 0.5\text{ м};$$

$$t_0 = t_{1\Pi} = t_{2\Pi} = 16^\circ\text{C}; \quad q_1 = 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; \quad q_2 = 0,02 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}};$$

$$\alpha = 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad c = 1,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad k = 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{с}}; \quad \tau = 80 \text{ суток}.$$

Их анализ говорит о росте температуры до критической для хранения насыпи пищевого сырья при ширине слоя с очагом самосогревания, приближающемся к 0,5 м при выбранных условиях хранения (рисунок 2, кривая 2).

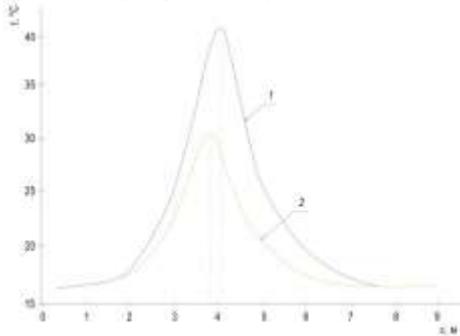


Рисунок 2 – Распределение температуры по высоте слоя пищевой насыпи: 1 – $\Delta h=1\text{ м}$; 2 – $\Delta h=0,5\text{ м}$.

Выполненные расчеты дают несколько завышенные значения температур, что способствует более раннему предупреждению самовозгорания насыпей зерна. Для обеспечения наиболее комфортных условий хранения при сделанных допущениях кроме теплового, был сделан кинематический и силовой анализ элементов конструкций обеспечивающих активное вентилирование.

В частности полученные результаты проведённых расчетов представлены в геометрическом виде (рисунок 3 и 4), записанные в явном виде для скорости перемещения зерновой массы виде по оси шнека V_z виде и при предположении, что нагрузка на лопасти ворошителя $Q = 100 \text{ кг/м}^2$, а его диаметр $D=2-3 \text{ м}$, $dp/dz = 1-3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ и $\mu=12-16 \text{ м}^2/\text{с}$ (напор и условную кинематическую вязкость перед расчётом нормировали, привязав к общепринятым значениям этих характеристик). Следует отметить, что для ожидаемого характера изменения скорости перемещения зерновой массы (рисунок 3) явно прослеживается экстремальный характер кривых, что говорит о важности выбора диаметра шнекового ворошителя для зерна различных влажностей.

В частности полученные результаты проведённых расчетов представлены в геометрическом виде (рисунок 3 и 4), записанные в явном виде для скорости перемещения зерновой массы виде по оси шнека V_z виде и при предположении, что нагрузка на лопасти ворошителя $Q=100 \text{ кг/м}^2$, а его диаметр $D=2-3 \text{ м}$, $dp/dz = 1-3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ и $\mu=12-16 \text{ м}^2/\text{с}$ (напор и условную кинематическую вязкость перед расчётом нормировали, привязав к общепринятым значениям этих характеристик). Следует отметить, что для ожидаемого характера изменения скорости перемещения зерновой массы явно прослеживается экстремальный характер кривых, что говорит о важности выбора диаметра шнекового ворошителя для зерна различных влажностей.

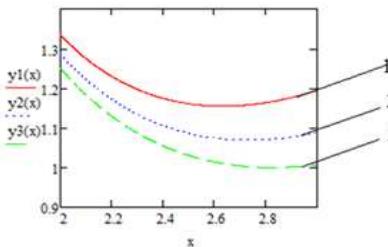


Рисунок 3 – Скорость перемещения зерновой массы вдоль лопасти при различной влажности зерна: 1 – 12 %, 2 – 14 %, 3 – 16 %

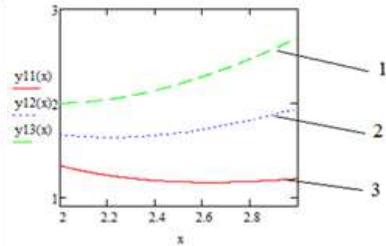


Рисунок 4 – Скорость перемещения зерновой массы вдоль лопасти при различном напоре: 1 – 3 $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$; 2 – 2 $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$; 3 – 1 $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$

Так, например, для диаметра шнекового ворошителя $D=2,6 \text{ м}$ и влажности зерна $W=12 \%$, скорость его перемещения минимальна, но возрастает с увеличением диаметра витков ворошителя. Это связано, по-

видимому, с возрастанием центробежной силы, которой становится достаточно для перемещения высушенных зерен. В то же время кривые (рисунок 4) говорят об изменении характера убывания скорости при малых напорах к возрастанию при больших напорах. Так, например, даже более сухое зерно ($W=12\%$) перемещается медленнее, чем более влажное ($W=16\%$) при существенном снижении напора теплоносителя от $3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ до $1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$. Обе группы графиков говорят о неравномерности распределения скоростей вдоль лопасти ворошителя в процессе работы, а значит о наличии ускорений и, следовательно изменении действующих сил на различные участки лопастей ворошителя при изменении его диаметра. Эти обстоятельства обязательно должны учитываться при проектировании ворошителей и при их эксплуатации.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований технологического оборудования для переработки зерновых, включая усовершенствованных традиционных и новых конструкций.

В рамках идентификации параметров модели отвечающих за несанкционированные величины температуры в хранилище решали соответствующую систему дифференциальных уравнений для достаточно больших значений чисел Фурье (большой длительности хранения сырья или высоких значений термоинерционных свойств материала или достаточно небольшой высоты насыпи сырья) можно получить упрощенные формулы для расчета средней температуры сохраняемого материала. Так, при $m=1$ и $F_0 \gg F_{01}$; $F_0 \gg F_{02}$ для $\nu=1$ (аналогично для $\nu=2$) имеем:

$$\bar{t}_1(\tau) = t_1 + (t_2 - t_1) \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} - \sqrt{\frac{2a\tau_2}{\pi} - \frac{\sin^2 \frac{\pi\tau_1}{\tau_2}}{\pi n}} \right) + \frac{P_{01}}{3}.$$

Аналитические оценки решения полученной краевой задачи могут быть получены методом интегральных преобразований.

Полученные результаты целесообразно проанализировать графически. На рисунке 5 приведены сравнительные зависимости теоретического распределения температуры по толщине сохраняемого слоя при изменении числа Фурье. Полученные результаты для их использования в практических целях или для дальнейшего уточнения аналитической постановки задачи интересно сравнить с данными эксперимента.

В качестве экспериментальных были использованы данные работы по хранению крахмалосодержащего сырья в складе. В связи с тем, что разность

влажностей по слоям при закладке партии ($x=0$) колебалась незначительно, значение k_2 принимали равным нулю. Значение влажности сырья в слое в начальный момент времени $W(Z,0)$ составляло значительно менее 10 %, значение температуры t_0 принималось близким к комнатной.

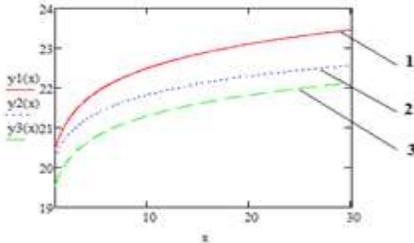


Рисунок 5 – Теоретическое распределение температур по толщине слоя (ось x – число Фурье, X – безразмерная координата):

1 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,17$; 2 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,5$; 3 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,83$

В связи с тем, что разность влажностей по слоям при закладке партии ($x=0$) колебалась незначительно ($\pm 0,2$ %), значение k_2 принимали равным нулю. Значение влажности сырья в слое в начальный момент времени $W(Z,0)=8,4$ %, значение температуры $t_0=16$ °C, $k_1=0,8 \cdot 10^{-7} \text{c}^{-1}$ $q_0=0,013$ Вт/кг. Это соответствует оценкам теплоты выделения сырья с такой влажностью и температурой, полученным по данным работы. Результаты расчетов для насыпи сырья высотой 3 м приведены в таблице 1, где число Фурье выбирали в форме

$$F_o = \frac{\alpha \tau}{h^2}.$$

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные значения ($t_1 = 24^\circ\text{C}$; $t_2 = 22^\circ\text{C}$)

$F_o, 10^3$	$X=0,17$		$X=0,5$		$X=0,83$	
	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{эксп}}$	$t_{\text{расч}}$
1	-	20,6	-	20,1	-	19,2
3	22	21,4	20	21,2	13	20,8
6	-	21,9	-	21,5	-	21,0
9	-	22,3	-	21,8	-	21,3
13	23	22,6	21	22,0	20	21,5
17	-	23,0	-	22,2	-	21,7
20	23	23,2	31	22,3	29	21,9
25	-	23,4	-	22,4	-	21,9
30	-	23,5	-	22,5	-	21,9

Сравнение этих результатов с теоретическими целесообразно выполнить графически. На рисунке 6 приведены сравнительные зависимости экспериментального распределения температуры по

толщине сохраняемого слоя при практически наблюдаемом изменении числа Фурье. На рисунке 7 представлено распределение температур.

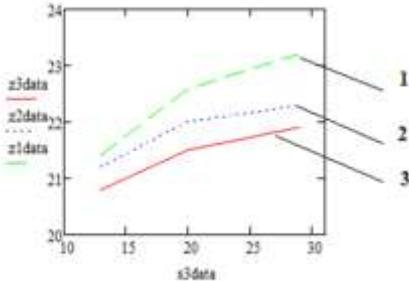


Рисунок 6 – Экспериментальное распределение температур по толщине слоя (x – число Фурье, X – безразмерная координата): 1 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,17$; 2 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,5$; 3 – для расстояния от поверхности слоя $X=0,83$

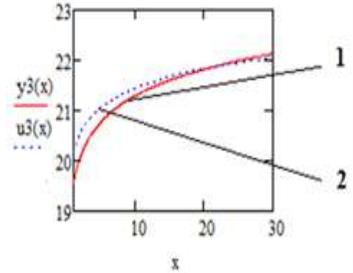


Рисунок 7 – Распределение температур для слоя $X=0,83$ (x – число Фурье, X – безразмерная координата): 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные данные (линия тренда).

Рисунки 6 и 7 говорят о том, что и теоретические и экспериментальные оценки дают погрешности не выше 10 %, что является приемлемым для использования при назначении реальных режимов хранения насыпей крахмалосодержащего сырья.

На рисунке 8 приведены сравнительные распределения теоретического и экспериментального распределения температур для поверхности, отстоящей от основания слоя на $X=0,83$, что свидетельствует о близости аналитических оценок к реальным температурам в насыпи хранящегося пищевого продукта. Определенный интерес представляет собой сравнение распределений температур в срединной поверхности хранящейся насыпи крахмалосодержащего сырья ($X=0,5$) по отношению к распределению на его верхнем уровне.

В рамках проведения пассивного эксперимента по активному вентилированию осуществляли сбор и обработку полученных экспериментальных данных с построением и анализом регрессионных зависимостей, а также выполняли экспериментальные исследования энергообеспечения оборудования сушки и выявляли возможности

производства модифицированных крахмалов из некондиционного зернового сырья.

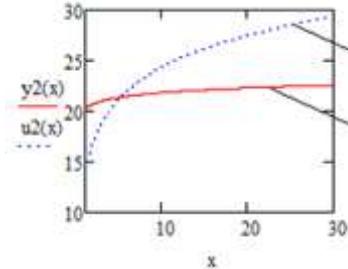


Рисунок 8 – Распределение теоретических температур по толщине слоя (x – число Фурье, X – безразмерная координата): 1 – при $X=0,50$; 2 – при $X=0,83$

Основной особенностью проведения экспериментальных исследований по совершенствованию условий

хранения зерновых, в частности с использованием активного вентилирования, является проведение их в натуральных условиях, то есть на работающих установках, без существенного изменения нормированных для них режимов.

Оценку параметров зерна производили в пассивном эксперименте, состоящем в фиксировании и обработке данных замеров производимых в течение 6 месяцев с периодичностью в 15 суток, предусмотренной регламентом активной вентиляции, в течение $t=60-90$ минут воздухом $t=15-20$ °С. Через смотровые лючки в срединной по высоте плоскости элеватора производились замеры с анализом проб, в том числе, на содержание в нем некондиционного зерна. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные замеров при пассивном эксперименте

№ п/п	Некондиция, %	Влажность, %	Скважистость, %	Температура, °С
0	3,01	12,17	56,20	16,62
1	3,50	12,17	52,66	17,12
2	3,63	12,72	56,20	17,65
3	3,70	13,27	56,20	18,35
4	4,03	14,37	52,66	19,10
5	4,11	12,17	49,12	20,13
6	4,53	14,37	56,20	22,03
7	4,66	12,72	49,12	23,56
8	4,69	13,27	49,12	25,86
9	4,70	14,37	50,89	27,62
10	5,43	14,37	49,12	30,50

На первом этапе проведения эксперимента определялась зависимость некондиционного зерна при хранении, принятых в качестве

функций отклика, от измеряемых параметров: влажности, скважности и температуры, в виде

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

Регрессионный анализ экспериментальных данных позволил построить уравнение регрессии выбранного типа для функции отклика Y .

$$Y = 2,44 + 0,18x_1 - 0,05x_2 + 0,09x_3$$

где x_1, x_2, x_3 – соответственно, влажность, скважность и температура.

Дополнительный анализ корреляционной матрицы показал, что коэффициенты взаимной корреляции отдельных контролируемых параметров на целевую функцию и тем более между самими варьируемыми параметрами занимают диапазон от -0,99 до 0,96. Это позволило предположить наличие нелинейной связи между функцией отклика и некоторыми из варьируемых параметров. Дополнительный анализ варьируемых параметров позволил выделить в них два фактора, которые потенциально могут влиять на характер (линейности или нелинейности) функции отклика: влажность и скважность.

С помощью пакета прикладных программ вычисляли необходимые оценки коэффициентов нелинейного уравнения регрессии, в результате чего получили

$$Y = 125,788 - 0,049x_1 - 4,605x_2 - 0,003x_1^2 + 0,041x_2^2 + 0,012x_1x_2$$

Хотя температура не участвовала в числе параметров нелинейного моделирования, вызывает интерес построение отдельной зависимости изменения количества некондиционного зерна от самой температуры. Такую модель строили с помощью программы CurveExpert 1.3. На рисунке 9 приведится ее графическое изображение.

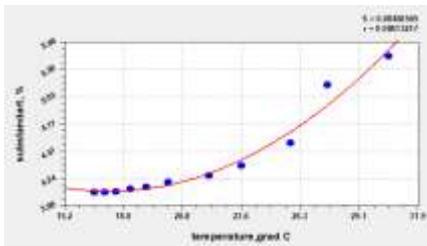


Рисунок 9 – Зависимость количества некондиционного зерна от температуры

В рамках возможности производства модифицированных крахмалов из некондиционного зернового сырья рассматривали возможности совершенствования традиционного оборудования производств модифицированных крахмалов. Такие производства реализуются на специализированных заводах и размещены, как правило, рядом с крупными элеваторами и зернохранилищами. Приведены

расчеты по эффективности работы усовершенствованных устройств для подсушки зерна при его закладке на хранение и возможные схему устройств для получения модифицированных крахмалов из нативного сырья и частично клейстеризованного.

Особый интерес представляют собой переработка некондиционного зерна в условиях его хранения для ограниченного континента потребителей, например, в условиях Крайнего Севера, вахтовых поселений, высокогорных населенных пунктов, «горячих точек» и других мест концентрации населения с долговременным пребыванием.

Специфика оборудования работающего для переработки сырья сравнительно небольших объемов состоит в повышенной производительности и его компактности. Одним из путей решения возникающих проблем является применение новых технологий связанных с экструзией пищевого сырья.

При проведении экспериментов на первом этапе технологии изготовления крахмальной суспензии для опытов использовались традиционный для нативного крахмала и разработанный Всероссийским НИИ крахмалопродуктов. Она включала тщательное перемешивание исходного продукта в воде при $t=50$ °С и выдержку полученной суспензии в течение часа, причем в качестве модифицирующих реагентов использовались 0,12 % FeSO_4 и 0,20 % H_2O_2 мас. сухих веществ.

Для подготовленных образцов определялась скорость гелеобразования в соответствии с разработанной методикой.

Сравнительный качественный анализ скорости гелеобразования определяли с помощью скоростной фотосъемки на подготовленных образцах крахмальных суспензий по скорости гелеобразования определяемой отношением эквивалентного диаметра растекания к времени гелеобразования (рисунок 10).

$$V = D/\tau, \text{ м/с}, \quad \text{или} \quad V = \frac{2\sqrt{S}}{\tau}, \text{ м/с}.$$

Сравнение полученных результатов эксперимента в течение времени от 5 до 20 минут свидетельствует о том, что модифицированные крахмалы имеют большую скорость гелеобразования, о чем свидетельствует меньшая скорость растекаемости клейстера (рисунок 11).

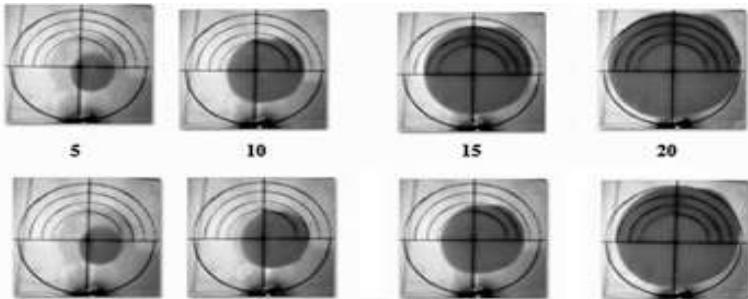


Рисунок 10 – Динамика гелеобразования крахмального клейстера при 50 °С (верхний ряд – растекание по измерительной сетке контрольных образцов, нижний ряд – растекание образцов, прошедших модификацию)

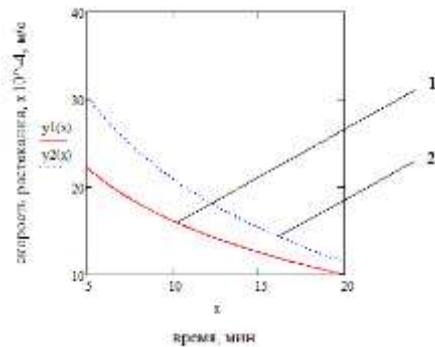


Рисунок 11 – Сравнительная характеристика скорости растекания клейстера: 1 – химически модифицированного; 2 – нативного

В целях совершенствования технологии производства модифицированных крахмалов для цехов малой производительности проведены исследования комбинированной термо-химической обработки зернового крахмала первого

сорта по ГОСТ 31935-2012 Крахмал пшеничный. Технические условия. Состав сырьевого источника для него выбирался в виде пшеницы с нижними требованиями по качеству, граничащими с некондиционным зерном по ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия. Химические реактивы использовались те же, что и в предварительном эксперименте с прежними дозировками.

Термо-химическую обработку такого зерна проводили на экструдере КЭШ-2, оснащенный необходимыми измерительными датчиками (рисунок 12), по режимам, рекомендованным для экструдирования крахмалсодержащего пищевого сырья.

После получения экструдированного продукта (рисунок 13) его измельчали на лабораторной молотковой дробилке МД 5×2 (рисунок 14) до максимальной степени.



Рисунок 12 – Установка для термохимической обработки зерна: 1 – шкаф управления; 2 – вольтамперметр; 3 – преобразователь давления; 4 – ПК с SCADA; 5 – система передачи давления; 6 – термоэлектрические преобразователи; 7 – тахометр; 8 – экструдер КЭШ-2.

Полученные термохимические модифицированные крахмалы использовали для выпечки мелкоштучных хлебобулочных изделий (рисунок 15).



Рисунок 13 – Экструдированный продукт



Рисунок 14 – Установка для измельчения продукта после термохимической обработки зерна



Рисунок 15 – Выпеченные при использовании разных крахмалов образцы мелкоштучных хлебобулочных изделий: 1 – нативный крахмал; 2 – химически модифицированный; 3 – термохимически модифицированный.

Органолептическая оценка показателей качества выпекаемых хлебобулочных изделий проводилась группой экспертов включающей проектировщиков теплового оборудования, технологов хлебопекарного производства и представителей заказчиков из сетевых универсамов, типа «Лента». Конкордация группы экспертов оценивалась по критерию Кенделла

$$W = \frac{12 S}{m^2(n^3 - n)},$$

где m – число экспертов в группе;

n – число факторов;

S – сумма квадратов разностей рангов (отклонений от среднего), вычисляемая по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m A_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right)^2.$$

Величина критерия 0,87 свидетельствовала о согласованности мнений экспертов.

В ходе анкетирования была сделана попытка выявления влияния основных органолептических показателей на качество хлебобулочных изделий, выпеченных с нативным крахмалом, химически модифицированным, термо-химически модифицированным.

В качестве дескрипторов для такой оценки выбирали показатели установленные для органолептического контроля Национальным стандартом РФ от 29 декабря 2005 г. N 480-ст (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели качества выпечных хлебобулочных изделий

Наименование показателя	Тип крахмала		
	Нативный	Химически модифицированный	Термо-химически модифицированный
Запах (1)	77	64	75
Поверхность (2)	22	41	31
Цвет (3)	21	37	38
Форма (4)	22	34	41
Пропеченность (5)	31	33	23
Промес (6)	16	15	17
Пористость (7)	5	14	8
Вкус (8)	30	41	48

Полученные данные подвергли статистической обработке, принимая общее качество изделия в качестве целевой функции, а отдельные показатели в качестве дескрипторов.

Для того чтобы более объективно оценить качество выпеченных изделий определяли площади фигур очерченных соответствующими кривыми. Полученные результаты представлены в таблице 4 и на рисунке 16.

Таблица 4 – Результаты опроса экспертов

Эксперт №	Вид крахмала		
	Нативный	Химически- модифицированный	Термо-химически модифицированный
1	77	64	75
2	22	41	31
3	21	37	38
4	22	34	41
5	31	33	23
6	16	15	17
7	5	14	8
8	30	41	48

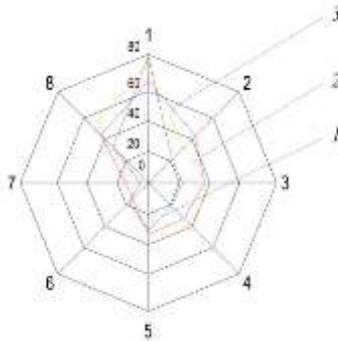


Рисунок 16 – Обработка результатов опросов по видам крахмала: 1 – нативный; 2 – химически модифицированный; 3 – термо-химически модифицированный

Результаты расчетов показали, что коэффициент заполнения для выпечки с использованием термо-химически модифицированного крахмала равен 1303, а для химически модифицированного крахмала 812,242. Таким образом, наилучшее показатели качества выпечных изделий содержащих термо-химически модифицированный крахмал.

В четвертой главе оценена эффективность и разработаны практические рекомендации по использованию результатов исследований, в том числе по конструированию зернохранилищ со шнековыми ворошителями, рациональным параметрам реализации процессов активного вентилирования зерна и совершенствования устройств для изготовления модифицированных крахмалов.

Совершенствование процесса вентилирования зерновой массы достигается за счет конструктивных изменений бункера. Для этого в конструкцию бункера для динамического вентилирования (рисунок 17) предлагается включить неподвижно зафиксированный цилиндр с винтовой лопастью, внутри которого зафиксированы шнековый ворошитель и воздуховод, через который подается под давлением теплый воздух. Шнековый ворошитель и воздуховод выполнены из составным коаксиальных перфорированных цилиндрических стоек.

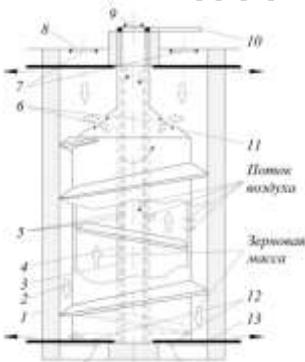


Рисунок 17 – Бункер для активного динамического вентилирования: 1 – корпус; 2 – цилиндр с винтовой лопастью; 3 – шнековый ворошитель; 4 – воздуховод; 5 – перфорация; 6 – отверстие; 7 – загрузочная воронка; 8 – откидная крышка; 9 – рекуператор; 10 – задвижка; 11 – горлышко; 12 – люк; 13 – крышка.

Предложено устройство для приготовления модифицированного крахмала (рисунок 18), содержащее корпус с загрузочной воронкой для измельченного крахмалсодержащего сырья, перфорированные ротор и прессующий вал, скребки и разгрузочные шнеки, расположенные внутри полых ротора и вала, кроме того оно снабжено пропиточной ванной с необходимыми химическими реагентами, в которой установлены верхний и нижний опорные валики и прижимной валок, который установлен с возможностью касания с нижним опорным валиком по срезу заполнения ванны реагентами.

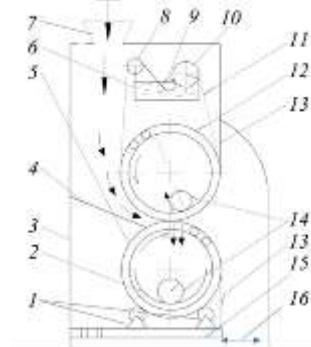


Рисунок 18 – Схема устройства для приготовления модифицированного крахмала: 1 – ролик-опора; 2 – лоток; 3 – корпус; 4 – перегородка; 5 – ротор; 6 – ванна; 7 – загрузочный бункер; поз. 8 – опорный валик; 9 – прижимной валик; 10 – верхний опорный валик; 11 – сетка; 12 – прессующий вал; 13 – нож; 14 – разгрузочный шнек; 15 – платформа; 16 – отверстие.

Основные выводы и результаты

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработан ряд математических моделей процессов сушки зерна в установках бункерного типа для различных граничных условий. Экспериментальная проверка для зерна влажностью $W=20-22\%$ для пласта самосогревания и $W=13-14\%$ для насыпного массива подтвердила справедливость полученных зависимостей.

2. Предложена методика идентификации параметров разработанной модели для бункерных установок с различными воздухораспределительными системами. Значение влажности сырья в слое в начальный момент времени $W(Z,0)=8,4\%$, значение температуры $t_0=16\text{ }^\circ\text{C}$, $k_1=0,8\cdot 10^{-7}\text{ c}^{-1}$, $q_0=0,013\text{ Вт/кг}$. Это соответствует оценкам теплоты выделения сырья с такой влажностью и температурой, полученным по данным работы.

3. Разработаны технические решения для распределенной подачи воздуха в бункерных установках. В частности полученные результаты проведенных расчетов представлены в геометрическом виде, а записанные в явном для скорости перемещения зерновой массы по оси шнека V_z виде и при предположении, что нагрузка на лопасти ворошителя $Q=100\text{ кг/м}^2$, позволяют определить его диаметр $D=2-3\text{ м}$, $dp/dz=1-3\text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ и $\mu=12-16\text{ м}^2/\text{с}$;

4. Разработан ряд устройств для повышения эффективности переработки некондиционного зерна в модифицированные крахмалы. В рамках возможности производства модифицированных крахмалов из некондиционного зернового сырья рассматривали возможности совершенствования традиционного оборудования производств модифицированных крахмалов.

5. Предложена конструкция системы воздухораспределения. Совершенствование процесса вентилирования зерновой массы достигается за счет конструктивных решений бункера для динамического вентилирования, в конструкцию которого включен цилиндр с винтовой лопастью, внутри которого зафиксированы шнековый ворошитель и воздуховод, через который подается под давлением теплый воздух.

6. Разработаны методики расчета конструктивных элементов бункерных сушильно-вентиляционных установок.

7. На основании полученных эмпирических моделей выработаны практические рекомендации по совершенствованию зернохранилищ для

многоцелевого назначения с принципом динамического активного вентилирования.

8. Предложены конструктивные решения совершенствования технологического оборудования для хранения зерна и производства модифицированных крахмалов из некондиционного зерна. Их новизна подтверждена патентом РФ на изобретение № 2738535 и патентом РФ на полезную модель № 200974.

Условные обозначения

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования SCOPUS

1. Analysis of the nature of features of heat and mass transfer in discrete bulk of food products Applied Mathematics [Text] / Voronenko B.A., Leu A.G., Abushinov E.V., **Yukhnik I.P.** // Computational Science and Mechanics: Current Problems IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1479 (2020) 012105, pp 1-9. IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1479/1/0121.

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Особенности конструкции червячных ворошителей для активного вентилирования зерна / Г.В. Алексеев., А.А. Бирченко, **И.П. Юхник**, А.А. Дерганосова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. Т.3, №3, 2020. – С.66-72. DOI: 10.14529/food200308.

3. Совершенствование шнекового ворошителя динамического вентилирования для мукомольной отрасли / **И.П. Юхник** // Хлебопродукты № 7, 2020. – С. 51-55. DOI: 10.32462/0235-2508-2020-29-7-51-55.

4. Нагреватель для систем активного вентилирования зерна / Г.В. Алексеев, А.А. Бирченко, **И.П. Юхник**, А.А. Дерганосова // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 3 (78). С. 51-56.

5. Совершенствование технологического оборудования для получения модифицированного крахмала / Г.В. Алексеев, А.Г. Леу, **И.П. Юхник** // Ползуновский вестник № 2, 2020. – С. 3-7. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.000.

6. Аналитическое исследование температурного поля насыпи крахмал- или пектиносодержащего сырья при управляемых тепловых

воздействиях / Г.В. Алексеев, О.А. Егорова, **И.П. Юхник**, С.А. Романчиков // Вестник Международной академии холода. № 4. 2020. –С. 53-60.

7. Моделирование температурного поля насыпи крахмал- или пектинсодержащего сырья при внутреннем самосогревании / Г.В. Алексеев, О.А. Егорова, А.Г. Леу, **И.П. Юхник** // Научный журнал «Известия КГТУ». – 2020, –№ 59. – С. 111-118. DOI 1997-3071-2020-59-111-118.

Статьи и материалы конференций

8. Новое оборудование для подготовки сырья при получении модифицированных крахмалов / А.Г. Леу, В.А. Арет, **И.П. Юхник** // TECHNICAL SCIENCE / «Colloquium-journal» №11(63), 2020. –С. 24–26. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11720,

9. Экспериментальные исследования оборудования для энергообеспечения сушки зерна / С.А. Романчиков, **И.П. Юхник** // Материалы международная научно-техническая конференция за 2020 год В 2 ч. Ч.1. / под общ. ред. проф. С.Т. Антипова; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2020. – С. 75-77.

Патенты на изобретения РФ

10. Пат. № 2738535 РФ, *F26B 17/22, F26B 21/04*, Бункер для динамического вентилирования зерна / **И.П. Юхник**, А.Н. Дегтярев, Э.Ф. Абдурахманов, О.И. Николук, – № 2020121863; заявлено 26.06.2020; опубликовано 14.12.2020; Бюл. № 35.

11. Пат. № 200974 РФ, *A01F 25/14* Бункер для динамического вентилирования зерна / **И.П. Юхник**, С.А. Романчиков, Е.В. Уточкин, О.С. Корнеева, В.А. Бабошин, В.В. Пушкарь, В.И. Пахомов, К.Н. Савинов – № 2020121943; заявлено 26.06.2020; опубликовано 20.11.2020; Бюл. № 32.

Подписано в печать 30.12.2020. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий»
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии

394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19