

Автор едр.

3-33

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ОПТИМАЛЬНЫХ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ВЫМОЛЬНЫХ БИЧЕВЫХ МАШИН,
ПРИМЕНЯЕМЫХ НА МЕЛЬНИЦАХ

(Диссертация написана на русском языке)

Специальность 05.175 – Машины и аппараты пищевой
промышленности

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1972

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ОПТИМАЛЬНЫХ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ВЫМОЛЬНЫХ БИЧЕВЫХ МАШИН,
ПРИМЕНЯЕМЫХ НА МЕЛЬНИЦАХ

(Диссертация написана на русском языке)

Специальность 05.175 – Машины и аппараты пищевой
промышленности

Дереулет 1987

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1972

к. б. 1973

Одесский технологический
институт пищевой промыш-

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова и на мельничном заводе „Новая победа“.

Научный руководитель:
кандидат технических наук профессор Л.И. КОТЛЯР.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук профессор П.Н. ПЛАТОНОВ;
кандидат технических наук доцент Н.В. ОСТАПЧУК.

Оппонирующая организация – Всесоюзный научно-исследовательский и экспериментально-конструкторский институт продовольственного машиностроения (ВНИЭКИПродмаш).

Автореферат разослан „19“ апреля 1972 г.

Защита диссертации состоится „19“ мая 1972 г.
на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

Просим отзыв в двух экземплярах направить по адресу:
г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

доцент

Г.Г.ЦЫБУЛЬСКИЙ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В РАБОТЕ

A_n	зольность (на абсолютно сухое вещество) поступающего продукта, %;
$A_{пр}$	- - - - проходового продукта, %;
$A_{сх}$	- - - - сходового продукта, %;
A_m	- - - - муки (38/0), %;
α	угол атаки бичей, град;
β	круговой шаг бичей, град;
d	диаметр отверстий в перфорированной обечайке, мм;
δ	радиальный зазор между концом бича и образующей цилиндрической перфорированной обечайки, мм;
E_m	эффективность вымольной машины, оцениваемая выходом муки, %;
E_k	- - - - изменением содержания крахмала (с учетом выхода муки);
$E_{км}$	- - - - содержанием крахмала в извлекаемой муке, %;
$E_{ам}$	- - - - изменением зольности (с учетом выхода муки), %;
E_a	- - - - изменением зольности;
E_w	- - - - расходом энергии на извлечение муки, Вт.ч/кг;
$E_{эт}$	энерго-технологический критерий эффективности вымольной машины, кг/Вт.ч;
G_m	выход муки, %;
G_n	количество поступающего продукта, %;
$G_{пр}$	- проходового продукта, %;
$G_{сх}$	- сходового продукта, %;
K	средняя крупность частиц отрубистого продукта, мм;
K_n	содержание крахмала в поступающем продукте, %;
$K_{пр}$	- - в проходовом продукте, %;
$K_{сх}$	- - в сходовом продукте, %;
K_m	- - в муке, %;
K_p	коэффициент напряженности силового поля;
q	интенсивность загрузки перфорированной обечайки продуктом, кг/(ч.м ²);
L	длина перфорированной обечайки, мм;

m_m	масса муки, кг;
m_p	- исходного продукта, кг;
$m_{пр}$	- проходowego продукта, кг;
$m_{сх}$	- сходового продукта, кг;
$m_э$	- эндосперма, кг;
$M_{пр}$	содержание муки в проходовом продукте, %;
R_p	радиус бичевого ротора, мм;
$\mathcal{E}_п$	содержание эндосперма в поступающем продукте, %;
$\mathcal{E}_{пр}$	- - в проходовом продукте, %;
$\mathcal{E}_{сх}$	- - в сходовом продукте, %;
$\mathcal{E}_м$	- - в муке, %;
$\mathcal{E}_{пр}$	извлечение эндосперма в проходовой продукт, %;
$\mathcal{E}_{сх}$	- - в сходовый продукт, %;
U_p	окружная скорость вращения бичевого ротора, м/с;
$W_{38/0}$	расход энергии на извлечение муки, Вт.ч/кг;

Условные обозначения бичевых машин

1Г	горизонтальная однороторная вымольная машина;
2Г	- двухроторная вымольная машина;
1В	вертикальная однороторная вымольная машина;
2В	- двухроторная вымольная машина;
ЗВО	- однороторная вымольная машина марки ЗВО-2;
С	- - - - итальянской фирмы Сангати.

В В Е Д Е Н И Е

В Директивах XXIУ съезда КПСС и в законе „О государственном плане развития народного хозяйства СССР на 1971–1975 годы” предусмотрено значительное увеличение производства муки, особенно высоких сортов. Одновременно должно быть улучшено качество всей вырабатываемой продукции. В этих целях необходимо существенно повысить эксплуатационно-технический уровень применяемого оборудования на основе создания новых высокоэффективных орудий труда либо технологической модернизации действующего оборудования, используя в этих целях современные достижения науки, техники и передовой опыт.

Интенсификация процессов производства муки должна сопровождаться технически и экономически рациональным повышением уровня продовольственного использования зерна. Поэтому процесс отделения краевых частей эндосперма от покровных тканей (оболочек) зерна (вымольный процесс) имеет важное значение. В настоящее время в СССР и за рубежом этот процесс базируют главным образом на применении бичевых машин, различных по их конструктивно-технологическому решению.

В отрубях, получаемых в результате обработки так называемых сходовых продуктов, содержится от 15 до 25 % крахмала, что составляет от 5 до 9 % содержания его в зерне пшеницы. Следовательно, потенциальные ресурсы зерна пшеницы на мельницах сортового помола все еще используются недостаточно. В связи с этим научно-экспериментальное исследование, проведенное в производственных условиях, было предпринято для установления основных направлений повышения эффективности вымольных бичевых машин.

Работа состоит из семи глав, изложена на 211 страницах машинописного текста, включает 25 таблиц и 38 иллюстраций.

По данным литературы в главе 1 рассмотрены физико-технологические свойства и особенности (структура и хими-

ческий состав) зерновок пшеницы и их анатомических частей. Вымольный процесс существенно усложняется анизометричностью и анизотропностью частиц отрубистого продукта, различной степенью их микротрещиноватости, изменчивой прочностью связи краевых частей эндосперма с оболочками. Учет всех этих свойств и особенностей имеет большое значение для рационального конструирования вымольных машин.

Многообразие конструктивно-технологических решений вымольных бичевых машин обусловило необходимость проведения их анализа и деления на группы по наиболее существенным и практически важным признакам.

Обсуждение и обобщение ранее выполненных научно-экспериментальных исследований и производственно-технических испытаний вымольных машин проведено на основе использования комплекса частных и обобщенных критериев и показателей, оценивающих эффективность рабочего процесса (главы II и III).

В главе IV рассмотрен реализуемый в вымольной бичевой машине рабочий процесс, являющийся разделительно-обогащительным. Проведенное с физико-технологических позиций рассмотрение было необходимо для обоснования программы и методики исследования (глава V) и последующего математического описания этого процесса.

Применяемые различная ориентация рабочих органов вымольных машин и различный их кинематический и динамический режим вызвали необходимость постановки производственно-технологического исследования ряда машин отечественного и зарубежного производства (глава VI). Поставленные однофакторные пассивные эксперименты включали обобщение технологических показателей работы машин в режиме нормальной эксплуатации при варьировании их интенсивности загрузки верхнесходовыми продуктами II ÷ IV крупочных систем.

Конечной целью такого исследования было обоснование выбора наиболее рациональной конструкции вымольной машины для проведения дальнейших исследований. Такой машиной при обработке верхнесходовых продуктов II, III и IV крупочных систем оказалась горизонтальная двухроторная вымоль-

ная бичевая машина, разработанная в ВШМК Л.Е.Айзиковичем.

Для проведения испытаний и исследований вымольных машин на мельзаводе „Новая победа“ был создан стенд для ведения пассивных и активных экспериментов по заранее составленной программе изменения основных входных параметров при поддержании постоянными их избранных уровней.

В производственных условиях ограничено варьируемы — ми параметрами являются интенсивность загрузки и длина рабочей зоны вымольной машины, а возможным параметром регулирования ее эффективности — изменение окружной скорости вращения бичевого ротора. Результаты однофакторных экспериментов позволили установить, что указанные входные параметры возможно отнести к числу существенных. Методами априорного ранжирования факторов и ранговой корреляции установлено, что, кроме указанных факторов, на эффективность вымольной машины существенно влияют круговой шаг бичей и крупность обрабатываемого продукта. В связи с этим для предварительного изучения рабочего процесса вымольной машины была поставлена серия активных экспериментов с использованием дробного факторного эксперимента. В результате составлено ограниченное линейным приближением математическое описание рабочего процесса в вымольной машине, позволившее количественно оценить эффекты от влияния основных факторов и их взаимодействий при использовании некоррелированных входных параметров (глава УII). Учитывая практически вполне удовлетворительную воспроизводимость экспериментов (с ошибкой до 5%), получаемые в таких условиях экспериментально-статистические модели для избранного диапазона входных параметров следует считать справедливыми.

Для установления основных направлений оптимизации отделения краевых частей эндосперма от оболочек в вымольных бичевых машинах использован метод случайного баланса и улучшающий его метод ветвящейся стратегии; эти методы постановки отсеивающих экспериментов наиболее эффективны для выделения существенных (значимо влияющих на процесс) параметров. При использовании соответствующих программ и ЦЭВМ Минск-22 из всех влияющих на процесс параметров

были выделены доминирующие линейные эффекты и парные взаимодействия и составлены уравнения регрессии для двух параметров оптимизации – общего выхода муки (E_m) и содержания в ней крахмала ($E_{км}$). Компромиссное решение этих уравнений (путем полного перебора всех сочетаний параметров) позволило определить значения выделенных параметров, при использовании которых могут быть достигнуты наиболее высокие технико-экономические результаты процесса.

Таким образом, задачами предпринятого исследования явились:

1) производственное исследование применяемых вымольных бичевых машин отечественных и зарубежных конструкций для обработки крупных отрубистых продуктов в крупочном процессе в целях обоснованного выбора технологически наиболее рациональной машины для дальнейших исследований;

2) получение математического описания рабочего процесса в избранной бичевой машине с выделением значимо влияющих на процесс конструктивно-технологических параметров и их взаимодействий;

3) определение оптимальных значений выделенных параметров вымольных бичевых машин по избранным критериям оптимизации и проверка адекватности полученного математического описания реальному процессу.

Ниже излагается основное содержание работы.

ПРИМЕНЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫМОЛЬНЫХ БИЧЕВЫХ МАШИН

Анизотропные и анизометричные частицы, образующие отрубистый продукт, обладают различными прочностными, деформативными и др. механическими свойствами. Поскольку (судя по данным В.Я.Гиршсона и И.А.Наумова) предел прочности оболочек при растяжении значительно больше предела прочности эндосперма при этом типе деформации, то для отделения эндосперма от оболочек (без существенного измельчения последних) отрубистый продукт можно подвергать интенсивному силовому воздействию; вместо деформации сжа-

тия и сдвига (в вальцовом станке) более рациональной является деформация сдвига (среза) в сочетании с ударным и истирающим воздействиями на частицы продукта.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом для отделения краевых частей эндосперма при обработке крупных отрубистых продуктов в крупочном (драном) процессе широко используются бичевые машины: их применяют для самостоятельной либо комбинированной (совместно с вальцовыми станками, центрифугальными буратами и щеточными машинами) обработки отрубистых продуктов, а иногда в качестве измельчающе-сепарирующих машин, устанавливаемых после вальцовых станков.

В сложном силовом поле, создаваемом рабочим органом вымольной бичевой машины, действуют различные по модулю и направлению центробежные, ударные и фрикционные силы. В результате их воздействия на отрубистый продукт происходит различное по интенсивности отделение краевых частей эндосперма от оболочек и их измельчение.

Основными механико-технологическими факторами, обуславливающими отделение краевых частей эндосперма от оболочек в вымольных бичевых машинах, следует считать:

а) ударно-истирающее воздействие ротора на обрабатываемый продукт; б) взаимодействие частиц и трение их о подвижные и неподвижные элементы рабочих органов; в) отделение эндосперма путем сдвига (среза) при проталкивании частиц через круглые отверстия в обечайке; г) вентиляторный эффект бичевого ротора, способствующий циркуляционному движению обрабатываемого продукта и перемещению его частиц через отверстия в обечайке при возникающем перепаде давления воздушного потока.

Такое воздействие на отрубистый продукт способствует интенсивному измельчению эндосперма, менее значительному деформированию и разрушению оболочек, нарушению связей между оболочками и алейроновым слоем (краевой частью эндосперма). Наличие перфорированной обечайки (разделяющего экрана) обуславливает образование двух существенно отличающихся по качеству продуктов: проходowego — со зна-

чительным содержанием эндосперма — и сходового — с пре-
валирующим содержанием оболочек.

При неизменном режиме работы машины с определенными конструктивно-технологическими параметрами на интенсивность разделительного процесса наиболее существенное влияние оказывают структурно-механические, фрикционные и аэродинамические свойства исходного отрубистого продукта и грануломорфологический состав частиц продукта.

Учитывая важное значение вымольных машин в интенсификации процесса выработки муки, прослеживается тенденция не только к технологически рациональному использованию этих машин, но и к конструктивному совершенствованию их. В связи с этим проведена классификация вымольных бичевых машин, в основу которой положены следующие конструктивные различия: а) пространственная ориентация ротора (горизонтальная и вертикальная) и бичей относительно оси его вращения (радиальная и продольная); б) размещение радиальных бичей на валу ротора, определяемое их круговым шагом; в) направление подачи продукта в рабочую зону вертикальных машин (сверху либо снизу); г) характер технологического сопряжения рабочих органов. Конструктивное решение машин обуславливают их геометрические, кинематические и загрузочные параметры.

Научно-экспериментальным исследованиям вымольных бичевых машин и их производственно-технологическим испытаниям посвящен ряд работ, из коих технологически наиболее значимыми являются исследования, проведенные Л.Е. Айзиковичем для изыскания рациональных способов отделения краевых частей эндосперма от оболочек. На ряде мельзаводов страны, а особенно на мельзаводе „Новая победа“, им был проведен анализ применяемых способов вымола оболочек, дана оценка технологической эффективности этого процесса (в сопоставлении с вальцовыми станками), сформулированы условия применения вымольных машин в крупном процессе при помолах различных типов. В результате изучения эффективности бичевых машин Л.Е. Айзиковичем и позднее С.Н. Лопатинским были предложены статистические зависимости (в виде эмпирических формул) технологических и энергетических показа-

телей от загрузочных, кинематических и геометрических параметров машин при обработке в них верхнесходовых продуктов III-У1 крупочных систем. Исследования Сибирского филиала ВНИИЗерна подтвердили выводы Л. Е. Айзиковича и С. Н. Лопатинского о том, что применение вымольных бичевых машин способствует сокращению производственного цикла, более эффективному использованию измельчающих и сепарирующих машин в размольном процессе, увеличению выхода и улучшению качества вырабатываемой муки, особенно второго сорта, повышению технико-экономических показателей мукомольного производства.

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВЫМОЛЬНОЙ МАШИНЕ

Рабочий процесс в вымольной машине, являясь разделительно-обогатительным, в значительной степени стохастичен, поэтому для установления некоторых тенденций развития этого процесса целесообразно воспользоваться вероятностным подходом.

Обрабатываемый отрубистый продукт состоит из совокупности неизмельченных (размером больше диаметра отверстий в обечайке) и измельченных частиц. Выраженное в долях единицы содержание таких частиц обозначим соответственно β_n и β_{in} при $\beta_n + \beta_{in} = 1$. Соотношение между величинами β_n и β_{in} зависит от вероятности p совместного наступления двух событий: попадания частицы под удар бича (в цикл) и измельчения ее, вероятности которых соответственно ρ и ρ_m , т.е. $p = \rho \rho_m$.

Согласно рассуждениям Л. П. Шупова, процесс обработки отрубистого продукта можно рассматривать как непрерывную последовательность элементарных циклов деформирования и разрушения частиц в результате ударно-истирающего воздействия на них рабочих органов машины. Число m этих циклов находится в линейной зависимости от продолжительности обработки продукта t , т.е. $m = k_1 t$, где k_1 - коэффициент, значение которого зависит от частоты вращения бичей и их кругового шага. Если допустить, что $p = \text{const}$, то соотно-

шение между β_n и β_{in} описывается экспоненциальной зависимостью

$$\frac{\beta_n}{\beta_{in}} = \exp(-\kappa t), \quad (1)$$

где $\kappa = [k, \ln(1-p)] t = m \ln(1-p)$.

Следовательно, величина отношения $\frac{\beta_n}{\beta_{in}}$ уменьшается с увеличением m и p (поскольку $p < 1$ и $\ln(1-p) < 0$). Увеличение t по закону арифметической прогрессии обуславливает уменьшение величины $\frac{\beta_n}{\beta_{in}}$ по закону сходящейся геометрической прогрессии.

В действительности же величина p не постоянна: она находится в прямой зависимости от частоты вращения бичевого ротора, пространственного положения частиц, их прочностных свойств, размеров и формы, а также от объемной концентрации продукта в рабочей зоне машины, и в обратной — от аэродинамического сопротивления воздушной среды. Поэтому действительное значение p устанавливается лишь экспериментально (скоростной киносъемкой при скорости кадров, равной частоте вращения бичевого ротора). Кроме того, в процессе обработки отрубистого продукта изменяются вероятности p и m . Наиболее существенна зависимость m от времени t ; по мере уменьшения β_n вероятность непопадания неизмельченной частицы в цикл будет подчиняться экспоненциальной зависимости: $1-m = e^{-\kappa_2 t}$, где κ_2 — коэффициент, зависящий от вероятности сложного события непопадания частицы в цикл в течение времени от 0 до t и от t до $(t + \Delta t)$ при $t = \text{varia}$ и $\Delta t = \text{const}$. Следовательно, с увеличением t вероятность попадания частицы в цикл увеличивается. Аналогично увеличение t по закону возрастающей арифметической прогрессии обуславливает изменение значения m по закону возрастающей геометрической прогрессии. Поэтому возможно ограничиться технологически рациональным значением t , определяемым длиной пути обработки продукта.

Исходный отрубистый продукт можно рассматривать, как двухкомпонентный, в котором относительное содержание эндосперма и оболочек соответственно x и $(1-x)$.

Если в моменты времени t_0 и t начальное и текущее содержание ценного компонента соответственно x_0 и x , то характеризуемая коэффициентом k (не зависящим от значения x) скорость убывания содержания эндосперма в обрабатываемом продукте в условиях данного режима и отрицательной обратной связи будет: $\frac{dx}{dt} = -kx$. Разделяя переменные и интегрируя полученное дифференциальное уравнение первого порядка, получим

$$x = x_0 \exp[-kt]. \quad (2)$$

Следовательно, при определенном значении x_0 с увеличением t содержание ценного компонента (эндосперма) в обрабатываемом продукте уменьшается по экспоненциальному закону.

Если для данных условий осуществления рабочего процесса часть эндосперма (в процентах), которая может быть извлечена из отрубистого продукта, выразить через ε_0 , то за время t обработки последнего количество эндосперма, поступающего в проходовой продукт, будет

$$\varepsilon_{np} = a [\varepsilon_0 - \Phi(\varepsilon_0, t)] = a \varepsilon_0 [1 - \exp(-kt)],$$

где $\Phi(\varepsilon_0, t)$ — часть эндосперма, которая номинально могла быть извлечена, но осталась неизвлеченной: $a < 1$ — коэффициент, характеризующий сепарирующее действие перфорированной обечайки.

Следовательно, возможное содержание эндосперма в проходовом продукте будет

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_{np} \frac{\varepsilon_n}{100} = a \varepsilon_0 [1 - \exp(-kt)] \cdot \frac{\varepsilon_n}{100}.$$

Для оценки эффективности вымольного процесса использована совокупность критериев, которые наиболее полно — количественно и качественно — характеризуют интенсивность разделения (измельчение исходного продукта, степень обогащения разделенных продуктов по крупности и добротности, извлечение ценного и неценного компонентов). Критерии, являясь однозначными выходными параметрами процесса, должны оценивать его с позиций конечной цели, обладать определенной универсальностью и наглядностью, быть статистически эффективными и иметь определенный физико-технологический смысл.

В зависимости от направленности и содержания того или иного этапа исследования были приняты различные комбинации частных и обобщенных критериев и показателей из приведенной ниже совокупности:

- выход проходowego и сходового продуктов

$$G_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}}}{m_n} \cdot 100, \quad G_{\text{сх}} = \frac{m_{\text{сх}}}{m_n} \cdot 100; \quad (3)$$

- извлечение эндосперма (крахмала) в проходовой и сходовый продукты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} \frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{\varepsilon_n} = G_{\text{пр}} \frac{K_{\text{пр}}}{K_n}, \quad \varepsilon_{\text{сх}} = G_{\text{сх}} \frac{\varepsilon_{\text{сх}}}{\varepsilon_n} = G_{\text{сх}} \frac{K_{\text{сх}}}{K_n}; \quad (4)$$

- содержание эндосперма (крахмала) в исходном, проходовом и сходовом продуктах и муке

$$\varepsilon_n = \frac{(m_{\varepsilon})_n}{m_n} \cdot 100 = K_n, \quad \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{(m_{\varepsilon})_{\text{пр}}}{m_n} \cdot 100 = K_{\text{пр}}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{сх}} = \frac{(m_{\varepsilon})_{\text{сх}}}{m_n} \cdot 100 = K_{\text{сх}}, \quad \varepsilon_m = \frac{(m_{\varepsilon})_m}{m_n} \cdot 100 = K_m;$$

- извлечение продукта, направляемого на формирование муки, и качество его, оцениваемое содержанием крахмала

$$E_m = \frac{(m_m)_{\text{пр}}}{m_n} \cdot 100 = G_m, \quad E_{\text{км}} = K_m; \quad (6)$$

- изменение зольности и содержания крахмала с учетом извлечения муки

$$E_{\text{ам}} = \frac{A_{\text{п}}}{A_m} G_m, \quad E_{\text{к}} = \frac{K_{\text{п}}}{K_m} G_m; \quad (7)$$

- индекс селективности Годена как отклик о состоянии и экономичности процесса

$$E_c = \frac{1 - B}{\frac{K_{\text{п}}}{K_{\text{пр}}} - B}, \quad \text{где } B = K_n + \frac{G_{\text{пр}}}{G_n} (1 - K_{\text{пр}}); \quad (8)$$

- энергоемкость процесса

$$E_w = W_{38\%}; \quad (9)$$

- обобщенная энерго-технологическая оценка разделитель-

но-обогащительного процесса

$$E_{\text{эп}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{ex}}} \cdot \frac{K_{\text{м}}}{K_{\text{сх}}} \cdot \frac{G_{\text{м}}}{W_{38/0}}$$

Поскольку зольность зерновых продуктов лишь косвенно характеризует их качество, предпочтительными явились критерии, использующие количественную оценку содержания крахмала в продуктах разделения.

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа предусматривала следующие взаимосвязанные стадии развития исследований:

I стадия – качественная оценка работы вымольной машины в целях установления номенклатуры и взаимосвязи основных входных (факториальных) и выходных (результативных) параметров;

II стадия – количественная оценка взаимосвязи входных (возмущающих и управляющих) воздействий на выходные параметры при избранных критериях эффективности реализуемого процесса;

III стадия – математико-статистическое обобщение экспериментальных данных (в виде корреляционных или регрессионных соотношений между входными и выходными параметрами) для обоснования основных конструктивно-технологических параметров, при которых достигается наиболее рациональная в технико-экономическом отношении эффективность вымольной машины.

Для реализации II стадии исследования научно-экспериментальные работы были разделены на такие этапы:

I этап – комплексное производственно-технологическое исследование шести вымольных бичевых машин, применяемых в крупочном процессе на мельницах сортового помола пшеницы, в целях обоснования выбора технологически наиболее рациональной конструкции для проведения дальнейших исследований;

II этап – исследование влияния загрузочных, геометрических и кинематических параметров в режиме нормальной эксплуатации на эффективность обработки верхнесходовых продуктов II ÷ IY крупочных систем в избранной вымольной бичевой машине;

III этап – постановка активных экспериментов для предварительного изучения рабочего процесса и получения математического описания его при различном подходе к оценке эффективности вымольной машины;

IV этап – постановка отсеивающих экспериментов (с применением метода ветвящейся стратегии и ЦЭВМ) в целях определения существенно влияющих на процесс факторов и их взаимодействий для получения математического описания рабочего процесса и установления дискретных областей использования совместимых управляемых факторов, удовлетворяющих оптимальности его ведения;

V этап – экспериментальная проверка соответствия полученных моделей описываемому процессу и оценка обоснованности предлагаемых рекомендаций.

При постановке экспериментов стремились избежать „шумов“ в виде возмущающих воздействий по такому входному параметру, каким является качество исходного продукта. Использованные в исследованиях верхнесходовые продукты II, III и IV крупочных систем получены при переработке смеси зерна пшениц I, III и IV типов общей стекловидностью ее $56 \pm 4\%$ и технологически нормальной влажностью. Зольность указанных верхнесходовых продуктов и содержание в них крахмала были соответственно в интервалах: $A_{II} = 2,98 - 3,10\%$ и $K_{II} = 51 - 55\%$; $A_{III} = 3,70 - 3,96\%$ и $K_{III} = 42 - 46\%$; $A_{IV} = 4,50 - 4,78\%$ и $K_{IV} = 32 - 35\%$.

КОМПЛЕКСНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ ВЫМОЛЬНЫХ БИЧЕВЫХ МАШИН

Исследованию были подвергнуты шесть бичевых машин при обычных значениях $q_v = 750 \div 1500$ кг/(ч.м²); данные о геометрических параметрах и кинематическом режиме этих машин приведены в табл. 1. Для оценки эффективности машин применены критерии и показатели $G_{пр}$, $\epsilon_{пр}$, $\epsilon_{ск}$, $M_{пр}$, E_k .

Для всех исследованных машин увеличение интенсивности их загрузки в указанном диапазоне обуславливает незначительное снижение относительного выхода проходowego продукта; так, при $q_v = 750$ кг/(ч.м²) – $G_{пр} = 15 - 30\%$; при $q_v = 1500$ кг/(ч.м²) – $G_{пр} = 12 - 27\%$. Следовательно, вымольные

машины работают достаточно устойчиво при наличии неконтролируемых возмущающих воздействий в виде изменений загрузочного режима.

Таблица 1

Условные обозначения исследованных машин	Ориентация бичей	Основные геометрические параметры рабочих органов		Механический режим работы		
		δ , мм	d , мм	U_p , м/с	$K_p = 0,1 \frac{U_p}{R_p}$	
1Г	Радиальная	10	0,8	34	642	
2Г	—	10	0,8	32	640	
1В	—	10	0,8	26	407	
2В	—	10	0,8	32	570	
ЗВ0	Продольная	12	0,8	28,5	427	
С	Продольная и радиальная	22	6	0,4	29,5	140

Однако повышение интенсивности загрузки вымольных машин приводит (табл. 2) к ухудшению эффективности разделительно-обогажительного процесса: $\epsilon_{пр}$ уменьшается, а $\epsilon_{сх}$ соответственно увеличивается.

В исследованных машинах интенсивность измельчения различна (см. табл. 3), поэтому не весь эндосперм, находящийся в проходном продукте, по своему гранулометрическому составу может быть отнесен к муке.

Следовательно, суждение об эффективности вымольной машины может быть произведено с привлечением показателей $M_{пр}$, G_m , $K_{сх}$, A_m , E_k . Судя по показателю G_m , для обработки продуктов II и III крупочных систем наиболее приемлемы машины 2Г и 2В, а для обработки продуктов IУ крупочной системы — машина С, в которой диаметр отверстий в обечайке меньше, чем в машинах 2Г и 2В.

К аналогичному выводу можно прийти, если учесть качество муки (A_m) и потери крахмала со сходовым продуктом ($K_{сх}$).

№ 6. 14973

Таблица 2

Верхне- сходовые продукты крупоч- ных систем	$q, \text{ кг/(ч.м}^2\text{)}$	Пока- зате- ли раз- деле- ния	Исследованные машины					
			1Г	2Г	1В	2В	3В0	С
II	750	$\xi_{\text{пр}}$	24,0	36,2	37,6	24,5	37,8	20,8
		$\xi_{\text{сх}}$	68,0	59,0	63,3	44,0	62,9	77,5
	1500	$\xi_{\text{пр}}$	20,7	24,2	26,2	22,9	36,2	22,4
		$\xi_{\text{сх}}$	77,0	77,8	73,5	50,5	66,2	80,5
III	750	$\xi_{\text{пр}}$	27,1	31,3	33,7	28,5	33,7	27,3
		$\xi_{\text{сх}}$	77,2	62,8	65,3	57,0	62,7	71,3
	1500	$\xi_{\text{пр}}$	22,8	25,1	31,3	21,6	33,7	27,3
		$\xi_{\text{сх}}$	86,4	82,0	68,1	64,0	63,5	74,3
IV	750	$\xi_{\text{пр}}$	25,3	28,6	38,8	29,1	29,1	32,4
		$\xi_{\text{сх}}$	84,0	73,2	60,3	59,6	59,6	56,8
	1500	$\xi_{\text{пр}}$	21,4	24,2	24,5	29,5	28,6	30,8
		$\xi_{\text{сх}}$	90,0	93,2	76,5	73,3	62,7	57,5

По сравнению с однороторными машинами (1Г, 1В) в двухроторных машинах потери крахмала меньше.

Результаты проведенного производственно-технологического исследования вымольных машин позволяют заключить, что по совокупности указанных выше количественно-качественных показателей горизонтальные двухроторные машины технологически более эффективны. К тому же, обобщая накопленный на мельнице „Новая победа“ опыт эксплуатации обследованных машин, можно заключить, что машина в таком исполнении динамически более устойчива и эксплуатационно более надежна, что особенно важно для непрерывно-поточного производства. Поэтому машина 2Г избрана в качестве объекта для дальнейших исследований.

Таблица 3

Верхнесходовые продукты кру- почных систем	Уменьшение содержание частиц крупных фракций						Увеличение содержания частиц мелких фракций					
	в исследованных машинах											
	1Г	2Г	1В	2В	3В0	С	1Г	2Г	1В	2В	3В0	С
II	21,4	25,7	17,6	29,3	24,4	12,7	<u>11,5</u>	<u>18,4</u>	<u>13,2</u>	<u>17,5</u>	<u>21,7</u>	<u>13,0</u>
							9,0	16,4	8,9	15,1	11,2	10,0
III	12,5	15,5	18,3	18,2	23,7	15,3	<u>7,8</u>	<u>12,4</u>	<u>15,8</u>	<u>13,5</u>	<u>18,2</u>	<u>15,1</u>
							7,0	10,1	3,0	11,3	8,4	12,4
IV	7,9	11,1	7,4	14,8	14,0	4,7	<u>3,8</u>	<u>5,9</u>	<u>3,6</u>	<u>4,6</u>	<u>4,0</u>	<u>4,6</u>
							4,0	6,4	5,0	6,3	6,4	14,3

ПРИМЕЧАНИЕ: Крупная фракция – сход с сит № 1, № 067;
мелкая фракция – сход с сит № 230 и № 38 и
проход сита № 38.

В знаменателе указан выход муки (G_m).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДВУХРОТОРНОЙ ВЫМОЛЬНОЙ БИЧЕВОЙ МАШИНЫ

II этап II стадии экспериментальных исследований про-
веден на машине 2Г при варьировании следующих входных па-
раметров: $q = 750 \div 1500$ кг/(ч.м²) при шаге варьирования
 $\Delta q = 250$ кг/(ч.м²); $U_p = 28 \div 40$ м/с при шаге варьиро-
вания $\Delta U_p = 4$ м/с; $L = 1$ и 2 м (при $q = 750$ кг/(ч.м²) и
 $U_p = 40$ м/с).

Если рассматривать гранулометрический состав исходного
и конечных продуктов и выделить из них крупную и мелкую
фракции (см. примечание к табл. 3), то можно получить пред-
ставление об интенсивности измельчения в условиях указанных
изменений q и U_p .

Для всех исходных продуктов при $q = \text{const}$ и увели-

чении U_p , либо при $U_p = \text{const}$ и увеличении q , интенсивность измельчения и извлечения эндосперма в проходовой продукт (E_{np}) соответственно возрастают либо уменьшаются.

Об эффективности вымольной машины 2Г можно также судить по выходу и качеству муки, оцениваемым показателями G_m , A_m и K_m ; при $q = \text{const}$ значение G_m находится в прямой зависимости от U_p , а A_m и K_m — в обратной. Следовательно, выбор эксплуатационного значения U_p при q и $L = \text{const}$ должен быть обусловлен поставленной технологической задачей.

Следует заметить, что при $q = \text{const}$ энергоемкость вымольной машины (E_w) с увеличением U_p возрастает при обработке верхнесходового продукта 11 крупочной системы и, наоборот, снижается при обработке продукта 1У крупочной системы. Если об эффективности машины судить по критерию $E_{эт}$, то можно заключить, что технологически целесообразно дифференцировать кинематический режим ее: для более крупных отрубистых продуктов (11 крупочной системы) приемлем более широкий диапазон окружных скоростей вращения ротора — 27 — 37 м/с, для более мелких продуктов (1У крупочной системы) — сравнительно узкий диапазон более высоких скоростей — 34 — 38 м/с.

На эффективность обработки отрубистых продуктов существенное влияние оказывает временной фактор, определяемый количеством используемых роторов: при двухроторном варианте вымольной машины, по сравнению с однороторным, извлечение эндосперма в проходовой продукт увеличивается более, чем в полтора раза. В связи с этим при сравнительно незначительном изменении качества муки повышается выход ее, а потери крахмала со сходовым продуктом снижаются (на 1,8 — 4,1%). Однако в зависимости от качества исходного продукта расход энергии на извлечение 1 кг муки увеличивается на 0,1 — 2,5 Вт.ч.

При сравнении результатов обработки отрубистых продуктов 11 ÷ 1У крупочных систем, полученных при изменении окружной скорости U_p и длины ротора L , выясняется различное влияние варьируемых параметров на показатели извлечения муки и ее качества. Так, при $L = \text{const}$ и увеличении U_p от 28 до 40 м/с G_m увеличивается на 2,0 — 2,2%, а K_m

снижается на 0,2 - 1,7%. При увеличении же длины ротора L с 1000 до 2000 мм при $U_p = \text{const}$ значения G_m и K_m соответственно возрастают на $5,7 \div 7,4\%$ и $0,4 \div 0,5\%$.

Следовательно, для повышения эффективности отделения эндосперма от оболочек технологически более целесообразно увеличение продолжительности обработки отрубистого продукта (в двух роторах). Это может быть достигнуто двумя путями: увеличением длины ротора при неизменной пропускной способности машины (применение двух роторов) либо уменьшением кругового шага бичей при рациональном значении U_p , обеспечивающем заданную пропускную способность.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВЫМОЛЬНОЙ БИЧЕВОЙ МАШИНЕ

В целях получения наибольшей информации о рабочем процессе в вымольной машине реализация III этапа II стадии программы исследований базировалась на использовании математических методов планирования экстремальных экспериментов. Такие методы, особенно целесообразные при постановке адаптированных экспериментальных исследований в производственных условиях, позволяют формализовать связи между входными и выходными параметрами рабочего процесса в виде экспериментально-статистических (математических) описаний. Производя анализ последних и вычисление статистик для проверки гипотез, возможно устанавливать условия, при которых рабочий процесс наиболее полно удовлетворяет критериям оптимальности в ограниченно дискретной области их применения.

Для выбора экспериментальной области факторного пространства на основе априорной информации установлено, что эффективность вымольной машины обуславливают следующие параметры:

- геометрические - круговой шаг бичей β и угол их атаки α , длина бичевого ротора L , величина радиального зазора между концами бичей и поверхностью перфорированной обечайки δ , диаметр круглых отверстий в обечайке d ;

- кинематические и технологические - окружная скорость вращения концов бичей ротора U_p , интенсивность загрузки машины продуктом q и его крупность K .

Использование априорного ранжирования и метода ранговой корреляции позволило установить, что для предварительного (поискового) изучения рабочего процесса в вымольной машине в качестве однозначных и независимых управляемых входных параметров следует принять основные влияющие на процесс факторы U_p , β , q и K .

В качестве выходных параметров использованы технологически наиболее важные критерии $E_{км}$, $E_{ам}$, $E_{эт}$, E_w .

В оптимальном двухуровневом плане проведения экспериментов входные параметры представлены в безразмерной системе координат значениями x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , найденными по формулам кодирования. Независимые, нормально распределенные выходные параметры обозначены символами y_1 , y_2 , y_3 и y_4 . Границы исследуемой области входных параметров (верхний и нижний уровни), их основной уровень и шаги варьирования установлены по эксплуатационно-техническим данным исследуемой вымольной машины.

По предварительно найденной мере изменчивости результатов опытов (по коэффициенту их вариации $V \approx 8\%$), при уровне значимости 0,05 и допустимой погрешности анализа $\Delta = \pm 5\%$ принята шестикратная повторность опытов с интервалом времени между отборами образцов, равным 1 ч. Для исключения влияния неконтролируемых возмущающих воздействий, а следовательно, уменьшения ошибки опытов, последовательность последних была рандомизирована во времени посредством таблицы случайных чисел.

Используя полурешлику от полного факторного эксперимента 2^4 , заданную генерирующим соотношением $x_1 x_2 x_3 = x_4$ и определяющим контрастом $I = x_1 x_2 x_3 x_4$, при котором снижается влияние неоднородности крупности продукта, получена приближенная статическая модель рабочего процесса в виде уравнений регрессии, представленных неполными квадратными уравнениями. Для статистической оценки последних (регрессионного анализа) использованы критерий Кохрена (для проверки равноточности опытов по сопоставлению с ошибкой их

воспроизводимости), критерий Стьюдента (для оценки значимости коэффициентов в уравнениях регрессии), критерий Фишера (для проверки адекватности полученных уравнений). Ортогональность матрицы планирования позволила получить независимые оценки коэффициентов регрессии. Сопоставление расчетных и табличных значений F -критерия (при 5%-ном уровне значимости) подтвердило гипотезу об адекватности представления экспериментов найденными уравнениями регрессии.

Для перехода от кодированных (x_i) к натуральным (\tilde{x}_i) значениям факторов использована формула $x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i_0}}{\Delta}$, где (\tilde{x}_{i_0}) и Δ — соответственно значения основного уровня фактора и интервала варьирования последнего — 1100 и 300 (для x_1), 40 и 5 (для x_2), 0,56 и 0,28 (для x_3), 34 и 6 (для x_4). После такого преобразования для каждого выходного параметра получены функции отклика в натуральных значениях факторов:

$$E_{AM} = 18,22 - 0,001q - 0,05\beta + 6,95K + 0,23U_p + 0,13KU_p; \quad (10)$$

$$E_K = 0,91 - 0,0002q - 0,01\beta + 3,27K + 0,003U_p - 0,0004qK + 0,12KU_p; \quad (11)$$

$$E_w = 25,84 + 0,02q + 0,14\beta + 31,00K + 1,56U_p - 0,02qK - 0,0004qU_p - 0,72KU_p; \quad (12)$$

$$E_{ЭТ} = (1,39 - 0,0005q - 0,003\beta - 0,44K - 0,02U_p + 0,0003qK + 0,00001qU_p + 0,009KU_p) \cdot 10^{-2}. \quad (13)$$

Анализ чувствительности принятых критериев (10–13) при изменении входных параметров в избранных интервалах свидетельствует о различном влиянии на них одних и тех же факторов. К большему росту значений E_{AM} и E_K приводит увеличение крупности обрабатываемого продукта и скорости вращения бичевого ротора. На энергоёмкость процесса (E_w) наибольшее влияние оказывает скорость вращения бичевого ротора, а энерго-технологический критерий $E_{ЭТ}$ зависит от всех факторов, но больше всего от интенсивности загрузки машины продуктом и его крупности. По сравнению с избранными геометрическими параметрами машины более значимы загрузочные и кинематические параметры ее.

Поскольку при различном подходе к оценке эффективности

вымольной машины влияние входных параметров оказалось неодинаковым, то для выявления условий оптимизации рабочего процесса был проведен IY этап исследований, в котором осуществлено планирование отсеивающих экспериментов в случайно сбалансированной матрице (метод случайного баланса). Этот метод, обладая большой разрешающей способностью, позволяет с достаточной степенью надежности выделить, ранжировать и количественно определить доминирующие эффекты от влияния факторов и их взаимодействий. Однако этот метод менее чувствителен, так как отнесенные к „шумовому полю“ эффекты увеличивают остаточную дисперсию.

В матрицу планирования экспериментов (табл. 4), обладающую свойством ортогональности, включены все влияющие на процесс факторы.

В качестве статистически эффективных выходных параметров оптимизации приняты наиболее объективные критерии, количественно оценивающие эффективность бичевой машины по извлечению продукта, используемого для формирования муки — G_m , и его качеству, характеризуемому содержанием крахмала — K_m .

Обработка экспериментальных данных проведена с применением метода ветвящейся стратегии, позволяющего последовательно уменьшать вклады в дисперсию при всевозможных комбинациях снятия эффектов от влияния факторов до получения минимальной дисперсии адекватности.

Алгоритм ветвящейся стратегии предусматривает выделение и оценку значимых эффектов в целях получения математического описания рабочего процесса. В случае адекватности реальному процессу описание может быть использовано для нахождения технологически оптимальных значений выходных параметров.

Для решения поставленной задачи, пользуясь рекомендованной Гиредметом программой для ЦЭВМ Минск-22, для каждого из принятых критериев получены значения коэффициентов регрессии, соответствующие значимо (по величине критерия Стьюдента) влияющим на процесс факторам и их взаимодействиям. На этом основании составлены математические описания процесса в натуральных значениях переменных:

Таблица 4

Обозначение факторов	$x_1(\beta)$	$x_2(L)$	$x_3(\alpha)$	$x_4(\delta)$	$x_5(d)$	$x_6(U_p)$	$x_7(q)$	$x_8(K)$	Экспериментальные значения выходных параметров	
	град	мм	град	мм	мм	м/с	кг/(ч.м ²)	мм	γ_1	γ_2
Основной уровень	40	1500	45	12,5	0,75	34	1100	0,55	γ_1	γ_2
Интервал варьирования	5	500	5	7,5	0,35	6	300	0,28		
Верхний (+) уровень	45	2000	50	20,0	1,10	40	1400	0,83	E_m	$E_{км}$
Нижний (-) уровень	35	1000	40	5,0	0,40	28	800	0,27		
Опыт № 1	+	+	-	+	+	-	+	+	11,75	77,2
" № 2	+	+	+	-	-	-	-	-	9,89	74,1
" № 3	+	-	-	+	+	+	-	+	7,60	73,9
" № 4	-	-	-	+	-	+	-	+	8,60	76,5
" № 5	+	+	-	-	-	-	-	+	9,05	77,4
" № 6	+	-	-	+	+	+	-	-	7,40	72,3
" № 7	-	-	-	-	+	-	-	+	7,62	78,9
" № 8	-	-	+	+	+	+	+	+	6,82	76,0
" № 9	+	-	+	-	+	-	-	-	6,07	72,7
" № 10	-	-	+	-	+	-	+	-	5,47	73,6
" № 11	-	+	-	-	-	+	+	-	9,77	73,7
" № 12	-	+	+	-	-	+	+	+	11,40	80,3
" № 13	+	+	+	-	-	-	+	-	8,93	74,3
" № 14	-	+	-	+	-	-	+	+	9,50	81,7
" № 15	+	-	+	+	+	+	+	-	7,16	72,7
" № 16	-	+	+	+	-	+	-	-	9,32	73,2

$$E = 3,1264 - 0,0006L + 1,2404K + 0,0041Ld + 1,9847d - 0,2329\alpha d + 0,1747\alpha + 0,1836\delta d - 0,1377\delta ; \quad (14)$$

$$E_{км} = 112,374 + 0,1044\alpha - 2,5949\alpha - 1,2928U_p + 9,2586K - 0,0167\delta U_p + 0,5678\delta + 0,0359\beta U_p - 1,2206\beta . \quad (15)$$

При доверительном интервале 0,95, вполне приемлемом для статистической проверки гипотез об эффективности обработки верхнесходовых продуктов в вымольной машине, полученные уравнения адекватно описывают процесс.

По уравнениям (14) и (15) можно заключить, что на эффективность вымольных бичевых машин влияют такие основные факторы:

- длина бичевого ротора L , обуславливающая продолжительность обработки продукта в рабочей зоне машины;
- окружная скорость вращения бичевого ротора U_p , определяющая интенсивность ударно-истирающего воздействия на частицы обрабатываемого продукта и количество движения, которое им сообщается;
- крупность продукта K , косвенно обуславливающая деформативные и прочностные свойства обрабатываемого продукта;
- диаметр отверстий в обечайке d , косвенно определяющий возможное соотношение между касательными и нормальными напряжениями в отрубистых частицах при проталкивании их через отверстия в обечайке.

Так как U_p , q и β не входят в уравнение (14), можно считать, что извлечение муки не зависит от этих параметров. Однако это касается лишь избранных интервалов варьирования этих параметров, которые оказались лежащими в околооптимальной области факторного пространства. То же относится и к параметрам L и q , не входящим в уравнение (15).

Нелинейность уравнений (14) и (15), свидетельствующая об описании почти стационарной области факторного пространства, позволила избежать крутого восхождения и определить по полученным уравнениям оптимальные значения параметров рабочего процесса путем перебора всех возможных сочетаний их значений в избранных интервалах.

Максимум извлечения муки E_m и содержания в ней крахмала $E_{км}$ достигается при обработке верхнесходовых продук-

тов II, III и IV крупочных систем соответственно в пределах 9,8% и 82,5%; 9,5% и 79,9%; 9,2% и 77,3% в условиях $\beta = 35^\circ$, $L = 2000$ мм, $\alpha = 50^\circ$, $\delta = 20$ мм, $d = 0,4$ мм, $U_p = 28$ м/с, $q = 800 \div 1400$ кг/(ч.м²). В исследуемой горизонтальной двух-роторной вымольной бичевой машине конструкции ВШМК приняты такие параметры: $\beta = 45^\circ$, $L = 2000$ мм (два ротора по 1000 мм), $\alpha = 36^\circ$, $\delta = 10 \div 14$ мм, $d = 0,8$ мм, $U_p = 32 \div 36$ м/с.

Сопоставление расчетных (по уравнениям 14 и 15) и опытных параметров оптимизации — E_m и $E_{км}$ — показало, что относительная ошибка находится соответственно в окрестности 5% и 0,5%. Это позволяет считать, что экспериментально-статистические методы получения математической модели непрерывного разделительно-обогажительного процесса, реализуемого в вымольной машине, вполне приемлемы как для прогнозирования эффективности вымола отрубистых продуктов, так и для статистической оптимизации процесса по избранным критериям.

Анализ изменения значения $E_{км}$ при варьировании каждого из параметров в принятых интервалах (при постоянных значениях остальных параметров) показывает, что этот показатель наиболее чувствителен к изменению окружной скорости вращения бичевого ротора, кругового шага бичей и диаметра отверстий в обечайке. Следовательно, при определенном содержании крахмала в исходном продукте повышение степени извлечения его в проходовой продукт может быть достигнуто рациональным сочетанием значений U_p , β и d . В связи с этим целесообразно предусмотреть возможность оперативного регулирования скорости вращения бичевого ротора в зависимости от физико-технологических свойств обрабатываемого продукта и необходимой интенсивности его обработки.

Для проверки соответствия полученной экспериментально-статистической модели реальному процессу поставлены опыты, в которых поочередно варьировали значения K , U_p и d при постоянных значениях $\beta = 35^\circ$, $L = 2000$ мм, $\alpha = 50^\circ$, $\delta = 20$ мм.

Из рассмотрения усредненных результатов контрольных опытов следует, что достигается вполне удовлетворительное согласие между величинами выходных параметров, вычислен-

ными по уравнениям (14) и (15), и экспериментальными значениями их.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Непрерывный рабочий процесс отделения краевых частей эндосперма от оболочек, осуществляемый в бичевых машинах, является сложным и многофакторным. Направления оптимизации этого разделительно-обогащительного процесса могут быть объективно выявлены на основе анализа математических моделей процесса, полученных экспериментально-статистическими методами.

2. Для оценки эффективности обработки отрубистых продуктов в вымольной машине могут быть применены такие технологически рациональные количественные и качественные критерии: интенсивность измельчения исходного продукта, полнота и четкость сепарирования измельченного продукта, относительное изменение содержания крахмала в продуктах разделения, удельные затраты энергии на образование единицы массы продукта, идущего на формирование муки.

Оперативный контроль эффективности вымольной машины целесообразно вести по двум основным критериям — по выходу продукта, используемого для формирования муки — E_m — и по содержанию крахмала в ней — $E_{км}$.

3. Из исследованных шести конструктивно-технологических решений бичевых машин в горизонтальном и вертикальном исполнении при обработке крупных отрубистых продуктов $II \div IY$ крупочных систем технологически и эксплуатационно более эффективна горизонтальная бичевая машина.

Используя вероятностный подход к изучению рабочего процесса в вымольной машине установлено, что в экспоненциальном кинетическом уравнении основным параметром (аргументом) является продолжительность обработки продукта. В связи с этим для повышения эффективности отделения краевых частей эндосперма от оболочек наиболее целесообразна двухроторная вымольная машина.

4. Использование математических методов планирования отсеивающих экспериментов позволило для двухроторной гори-

горизонтальной вымольной машины (при обработке в ней верхне-сходовых продуктов $11 \div 1У$ крупочных систем) выделить значимо влияющие на процесс факторы и их взаимодействия. Анализ составленного на этой основе математического описания рабочего процесса в виде неполных квадратных уравнений регрессии для E_m и $E_{км}$ привел к заключению, что оптимальные значения входных параметров машины таковы: круговой шаг бичей - 35° ; окружная скорость вращения бичевого ротора - 28 м/с; диаметр отверстий в перфорированной обечайке - 0,4 мм; рабочий зазор между концами бичей и поверхностью обечайки - 20 мм; угол атаки бичей - 50° ; интенсивность загрузки - $750 \div 1500$ кг/(ч.м²).

Экспериментальная проверка адекватности математического описания реальному рабочему процессу подтвердила вполне удовлетворительное согласие аналитических и опытных данных.

5. Широкое применение на действующих и строящихся мукомольных предприятиях двухроторных горизонтальных вымольных машин с указанными параметрами и оперативно регулируемым кинематическим режимом должно способствовать не только интенсификации сопряженных производственных процессов выработки муки при одновременном повышении уровня продовольственного использования пшеницы, но и обусловить технико-экономически целесообразную унификацию применяемого технологического оборудования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Запорожец Л.А. Исследование технологической эффективности бичевых вымольных машин. Бюллетень „Хранение и переработка зерна“, вып. 2, М., ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1969.

2. Запорожец Л.А. Эффективность действия бичевых вымольных машин в зависимости от их конструктивно-технологических схем и интенсивности загрузки продуктом. Бюллетень „Хранение и переработка зерна“, вып. 2, М., ЦИНТИ, Госкомзага СССР, 1970.

3. Запорожец Л.А. Влияние кинематического режима вымольной машины на технологическую эффективность ее действия. Труды ВНИЭКИПродмаш, вып. 23, 1970.

4. Запорожец Л.А., Котляр Л.И. Влияние механико-технологических параметров бичевых машин на эффективность отделения краевых частей эндосперма от отрубистых продуктов. Информационный листок № 14 ЦНИИТЭИ Минзага СССР, М., 1971.

5. Вайнберг А.А., Запорожец Л.А., Котляр Л.И. Машины для вымола оболочек зерна. Авторское свидетельство № 272037, класс 50 d , 1/50. Бюллетень „Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки“, № 18, М., 1970.

Основные результаты работы доложены на XXX, XXXI, XXXII научных конференциях в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова (январь 1969 г., апрель 1970 г., апрель 1971 г.) и на научных конференциях во Всесоюзном заочном институте пищевой промышленности (апрель 1968 г., апрель 1969 г., март 1970 г., февраль 1971 г.).

БР 04153 Подписано к печати 6.04.72 г. Объем 2 печ.л.
Уч.-изд.л. 1,8 Заказ № 494 Тираж 200 экз. 1972 г.

Лаборатория фотомеханической печати ОТИПП
имени М.В.Ломоносова, г.Одесса, ул.Свердлова, 112