

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

М.А. АЛЛЯМШИН, П.М. МУРАШЕВ, В.Н. БОГАТИКОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnbgtk@mail.ru

© Аллямшин М.А., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., 2020

Рассматривается нечеткая модель системы управления технологией хлебобулочных изделий как один из инструментов, используемый в экспертной системе для принятия решений. На основе выбранных параметров производятся оценка технологического процесса производства хлебобулочных изделий в малой пекарне и сравнение результатов экспериментов и работы нечеткой модели управления.

Ключевые слова: система контроля качества, технологический процесс, хлебобулочное изделие, случайные возмущения, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, декомпозиция, контекстная диаграмма, нечеткие правила.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-73-88

ВВЕДЕНИЕ

Хлебобулочные изделия входят в индивидуальный рацион питания человека, удовлетворяют его потребность в получении пищевых веществ: белков, жиров углеводов.

Для повышения качества работы системы управления технологией хлебобулочных изделий в работе рассматривается подход, основанный на применении экспертных систем [1, 2]. В настоящее время интеллектуализация систем управления является одним из основных инструментов, который позволяет решить проблемы управления в условиях неопределенности [3, 4].

Экспертиза – это система контроля качества сырья или продукции. Для организации эффективной работы системы контроля и управления на основе экспертных систем производства хлебобулочных изделий разрабатывается системная модель процесса [5]. Экспертиза в данном случае необходима для улучшения оценки качества готовой продукции через совершенствование системы контроля и выдачи рекомендаций по управлению технологией ведения процесса [4].

Характерные особенности промышленных технологий производства хлебобулочных изделий – наличие случайных возмущений, вызванных отклонениями по компонентному составу или нарушениями технологических параметров, сбоев в системах управления, поломка оборудования [6–9].

Цель работы – совершенствование контроля качества технологических процессов производства хлебобулочных изделий.

Задачи исследования:

1. На основании проведенного анализа современных подходов в принятии решений при управлении сложным динамическим объектом в условиях неопределенности, разработать функциональную структуру и правила принятия решений.

2. Обосновать целесообразность применения нечетко-логических моделей для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности процессов принятия решений и разработать нечеткую модель технологического процесса.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Общая аппаратурно-технологическая схема поточного производства хлеба на современном комплексно-механизированном хлебозаводе приведена на рис. 1. Она дает представление о последовательности отдельных стадий и рабочих операций процесса производства хлеба и о видах оборудования, которая охватывает весь цикл этапов и операций – от приема сырья хлебозаводом до отправки готовой продукции в торговую сеть [10]. Технологическая линия включает в себя бункерный тестоприготовительный агрегат 1. Управление работой тестомесильных машин 2, дозаторов муки 4, воды 3, раствора соли 6 и опары 11, смесителя 10 и насоса 9 для подачи воды на замес теста автоматизировано и ведется по заданной по времени программе с помощью командных приборов, установленных на центральном пульте 5. Механическая укладка кусков теста в формы 7 при помощи делительно-посадочного автомата и выгрузка готовых изделий на ленточный транспортер 8 исключают на этих участках ручные операции [11].

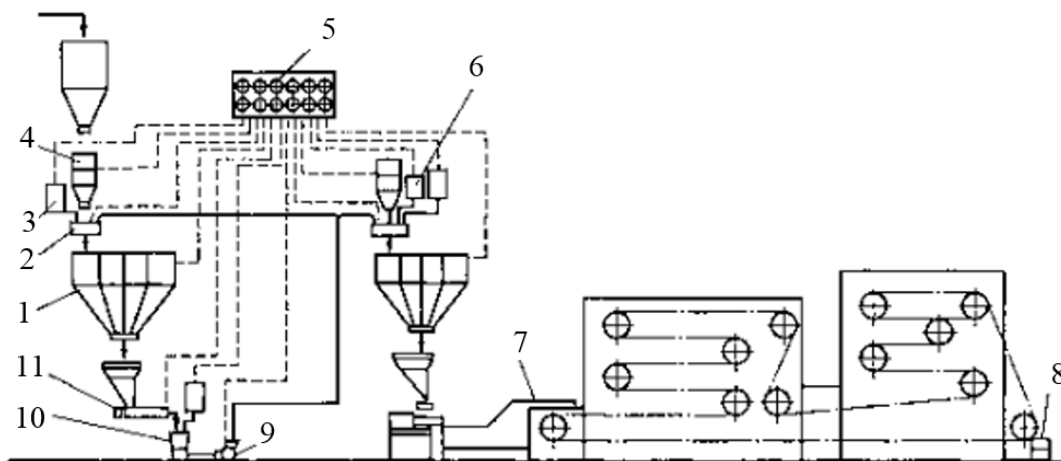


Рис. 1. Схема технологической линии для производства хлебобулочных изделий в малой пекарне [11]

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экструзивную обработку смеси на производстве осуществляют на одношнековом экструдере.

Результаты статистического исследования динамических режимов действующих агрегатов приведены на рис. 2 [9, 12]. Анализ рис. 2 выявил, что реально действующий агрегат находится под постоянным влиянием достаточно большого числа внешних возмущений, что приводит к «плаванию» технологических переменных в довольно широких пределах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие неопределенности параметров технологического процесса производства хлебобулочных изделий в малой пекарне [5, 13] объясняется отсутствием или неполнотой знаний о физико-химических параметрах процесса, широким спектром возмущающих воздействий и сложным характером их влияния [14, 15]. Для эффективного функционирования системы управления процессом производства

хлебобулочных изделий в малой пекарне необходимо разработать математические модели, методы и алгоритмы оценки состояний процесса, методы и алгоритмы принятия решений в целях обеспечения эффективной работы в различных производственно-технологических ситуациях [1, 16].

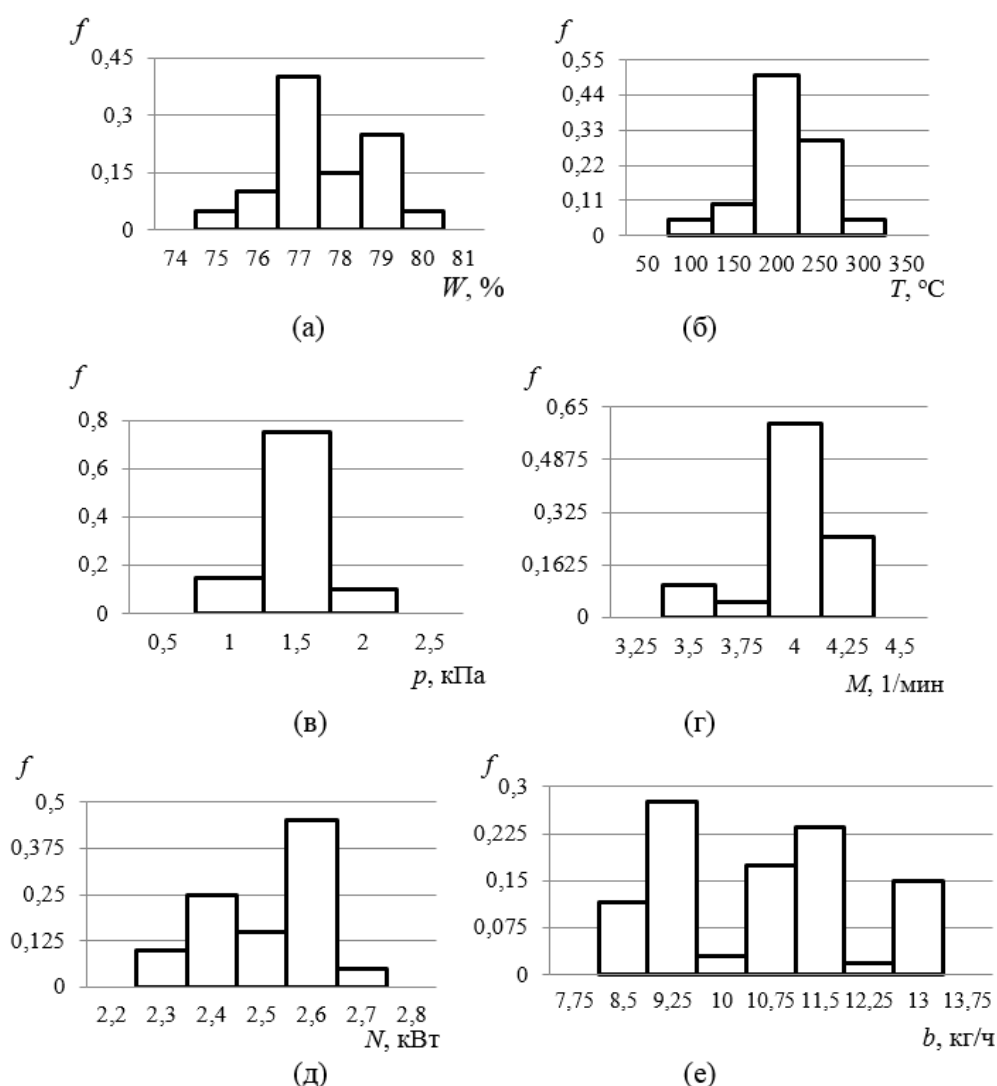


Рис. 2. Результаты статистического исследования входного участка пекарской камеры влажности W (а), температуры T (б), давления p (в), числа оборотов вращения M (г), потребляемой мощности N (д), расхода топлива b (е); f – частота попадания параметра в заданный интервал

В работе для идентификации состояний и управления процессом предлагается использовать методы нечетко-логического моделирования [9, 17]. При этом необходимо:

обосновать применения нечетко-логических моделей для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности процессом принятия решений и разработать соответствующую модель;

проверить адекватность разработанной модели;

разработать функциональную структуру и решающие правила принятия решений, используя результаты проведенного анализа современных подходов в принятии решений при управлении сложным динамическим объектом в условиях неопределенности [18, 19].

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В МАЛОЙ ПЕКАРНЕ

Состояние процесса управления будем оценивать шестью технологическими параметрами: $X = \{W, T, p, M, N, b\}$, где W – влажность технологического процесса печи, %; T – температура технологического процесса печи, °С; p – давление технологического процесса печи, кПа; M – число оборотов вращения технологического процесса печи, 1/мин; N – мощность технологического процесса печи, кВт; b – расход топлива технологического процесса печи, кг/ч;

Для оценки состояния процесса введем лингвистические переменные, определим их терм-множества и зададим функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной [20]. Формализация данных лингвистических переменных представлена в табл. 1–6.

Таблица 1. Формализация лингвистической переменной
«Влажность технологического процесса печи»

Область регламентного состояния W	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[75; 80]	Низкое	[75; 77,5]	1, при $75 < W < 76$ $1 / (1 + \exp(15 * (W - 76,75)))$ при $76 < W < 77,5$
	Среднее	[76; 79]	$1 / (1 + \exp(-15 * (W - 76,75)))$ при $76 < W < 77,5$ $1 / (1 + \exp(15 * (W - 77,75)))$ при $77,5 < W < 79$
	Высокое	[77,5; 80]	$1 / (1 + \exp(-15 * (W - 77,75)))$ при $77,5 < W < 79$ 1 при $79 < W < 80$

Таблица 2. Формализация лингвистической переменной
«Температура технологического процесса печи»

Область регламентного состояния T	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[100; 300]	Низкое	[100; 200]	1 при $100 < T < 150$ $1 / (1 + \exp(-2 * (T - 125)))$ при $150 < T < 200$
	Среднее	[150; 250]	$1 / (1 + \exp(2 * (T - 125)))$ при $150 < T < 200$ $1 / (1 + \exp(2 * (T - 225)))$ при $200 < T < 250$
	Высокое	[200; 300]	$1 / (1 + \exp(-2 * (T - 225)))$ при $200 < T < 250$ 1 при $250 < T < 300$

Таблица 3. Формализация лингвистической переменной
«Давление технологического процесса печи»

Область регламентного состояния p	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[1; 2]	Низкое	[1; 1,5]	1 при $1 < p < 1,25$ $1 / (1 + \exp(70 * (p - 1,125)))$ при $1,25 < p < 1,5$
	Среднее	[1,25; 1,75]	$1 / (1 + \exp(-70 * (p - 1,125)))$ при $1,25 < p < 1,5$ $1 / (1 + \exp(70 * (p - 1,875)))$ при $1,5 < p < 1,75$
	Высокое	[1,5; 2]	$1 / (1 + \exp(-70 * (p - 1,875)))$ при $1,5 < p < 1,75$ 1 при $1,75 < p < 2$

Таблица 4. Формализация лингвистической переменной
«Число оборотов вращения технологического процесса печи»

Область регламентного состояния M	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[3,5; 5]	Низкое	[3,5; 4,25]	1 при $3,5 < M < 3,875$ $1 / (1 + \exp(25 * (M - 3,6875)))$ при $3,875 < M < 4,25$
	Среднее	[3,875; 4,625]	$1 / (1 + \exp(-25 * (M - 3,6875)))$ при $3,875 < M < 4,25$ $1 / (1 + \exp(25 * (M - 4,8125)))$ при $4,25 < M < 4,625$
	Высокое	[4,25; 5]	$1 / (1 + \exp(-25 * (M - 4,8125)))$ при $4,25 < M < 4,625$ 1 при $4,625 < M < 5$

Таблица 5. Формализация лингвистической переменной
«Потребляемая мощность технологического процесса печи»

Область регламентного состояния N	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[23; 27]	Низкое	[23; 25]	1 при $23 < N < 24$ $1 / (1 + \exp(20 * (N - 24,5)))$ при $24 < N < 25$
	Среднее	[24; 26]	$1 / (1 + \exp(-20 * (N - 24,5)))$ при $24 < N < 25$ $1 / (1 + \exp(20 * (N - 25,5)))$ при $25 < N < 26$
	Высокое	[25; 27]	$1 / (1 + \exp(-20 * (N - 25,5)))$ при $25 < N < 26$ 1 при $26 < N < 27$

Таблица 6. Формализация лингвистической переменной
«Расход топлива технологического процесса печи»

Область регламентного состояния b	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[8,5; 13]	Низкое	[8,5; 10,75]	1 при $8,5 < b < 9,25$ $1 / (1 + \exp(10 * (b-10)))$ при $9,25 < b < 10,75$
	Среднее	[9,25; 12,25]	$1 / (1 + \exp(-10 * (b-10)))$ при $9,25 < b < 10,75$ $1 / (1 + \exp(10 * (b - 11,5)))$ при $10,75 < b < 12,25$
	Высокое	[10,75; 13]	$1 / (1 + \exp(-10 * (b - 11,5)))$ при $10,75 < b < 12,75$ 1 при $12,25 < b < 13$

По табл. 7–12, составленным на основе знаний экспертов, делается нечеткий логический вывод. Таким образом, определяется значение нечеткой переменной; приведение к четкости проводится центроидным методом. Полученная в результате максимальная удельная производительность и является центром технологической безопасности по данному параметру.

Таблица 7. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной влажности

Параметр	Значение		
	$N1$	$N2$	$N3$
$T1$	Низкое	Низкое	Среднее
$T2$	Среднее	Высокое	Среднее
$T3$	Среднее	Низкое	Низкое

Примечание: $T1$ – влажность; $T2$ – температура; $T3$ – масса; $N1, N2, N3$ – легкий средний, тяжелый вес соответственно.

Делаем, согласно табл. 7, нечеткий логический вывод:

1. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги.

2. Если «температура хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно либо добавить количество влаги, либо убавить газ в хлебопекарной печи.

3. Если «масса хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить или убавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги. Если «температура хлебобулочного изделия имеет

среднюю массу» – «высокое», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить газ в хлебопекарной печи.

5. Если «масса хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

6. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет тяжелую массу» – «среднее», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги или убавить газ в хлебопекарной печи.

7. Если «температура хлебобулочного изделия имеет тяжелую массу» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить газ в хлебопекарной печи.

8. Если «масса хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

Таблица 8. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной температуры

Параметр	Значение		
	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>
<i>T1</i>	Среднее	Среднее	Высокое
<i>T2</i>	Высокое	Среднее	Низкое
<i>T3</i>	Низкое	Среднее	Среднее

Примечание: *T1* – масса; *T2* – температура; *T3* – давление; *N1* – сухой; *N2* – влажный; *N3* – насыщенный.

Делаем, согласно табл. 8, нечеткий логический вывод:

1. Если «масса хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление или уменьшить температуру.

2. Если «температура хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «высокое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление либо убавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

3. Если «давление хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру в печи или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «масса хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить или уменьшить давление в зависимости от массы изделия.

5. Если «температура хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление либо добавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

6. Если «температура хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру и повысить давление в печи.

7. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «высокое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление или повысить температуру.

8. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление либо убавить температуру в хлебопекарной печи.

9. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить температуру в печи или уменьшить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

Таблица 9. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной давления

Параметр	Значение		
	N1	N2	N3
T1	Низкое	Высокое	Низкое
T2	Низкое	Среднее	Низкое
T3	Высокое	Низкое	Высокое

Примечание: T1 – влажность; T2 – давление; T3 – масса; N1 – прохладная; N2 – теплая; N3 – горячая.

Делаем, согласно табл. 9, нечеткий логический вывод:

1. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление или повысить температуру печи.

2. Если «давление хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить температуру или убавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

3. Если «масса хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «высокое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру в печи или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «высокое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить температуру в печи или уменьшить вес в зависимости от массы изделия.

5. Если «давление хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «среднее», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление либо добавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

6. Если «масса хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «низкое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить температуру и понизить давление в печи.

7. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить количество давления и температуру.

8. Если «давление хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

9. Если «масса хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «высокое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление и температуру в печи.

Таблица 10. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной число оборотов вращений

Параметр	Значение		
	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>
<i>T1</i>	Высокое	Низкое	Высокое
<i>T2</i>	Высокое	Среднее	Высокое
<i>T3</i>	Низкое	Высокое	Низкое

Примечание: *T1* – мощность; *T2* – время; *T3* – скорость; *N1* – двигатель работает медленно; *N2* – двигатель работает ускоренно; *N3* – двигатель работает быстро.

Делаем, согласно табл. 10, нечеткий логический вывод:

1. Если «мощность хлебопекарной печи двигатель работает медленно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно понизить скорость вращения двигателя.

2. Если «время хлебопекарной печи двигатель работает медленно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить электроэнергию в печи.

3. Если «скорость хлебопекарной печи работает медленно» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно уменьшить время приготовления хлебобулочного изделия.

4. Если «мощность хлебопекарной печи работает ускоренно» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить скорость вращения двигателя.

5. Если «время хлебопекарной печи работает ускоренно» – «среднее», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно понизить электроэнергию в печи.

6. Если «скорость хлебопекарной печи работает ускоренно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить время приготовления хлебобулочного изделия.

7. Если «мощность хлебопекарной печи работает быстро» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить время приготовления изделия.

8. Если «время хлебопекарной печи работает быстро» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить скорость вращения двигателя.

9. Если «скорость хлебопекарной печи работает быстро» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить электроэнергию в печи.

Таблица 11. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной мощности

Параметр	Значение		
	N1	N2	N3
T1	Низкое	Среднее	Низкое
T2	Среднее	Высокое	Среднее
T3	Высокое	Среднее	Высокое

Примечание: T1 – напряжение; T2 – сила тока; T3 – сопротивление; N1, N2, N3 – низкая, средняя, высокая потребляемая мощность соответственно.

Делаем, согласно табл. 11, нечеткий логический вывод:

1. Если «напряжение хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «низкое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить силу тока в цепи.

2. Если «сила тока хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить напряжение или понизить силу тока в цепи.

3. Если «сопротивление хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение и силу тока в цепи.

4. Если «напряжение хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить скорость вращения двигателя.

5. Если «сила тока хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить электроэнергию в печи.

6. Если «сопротивление хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить силу тока в цепи или понизить напряжение.

7. Если «напряжение печи – высокая потребляемая мощность» – «низкое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить силу тока в цепи.

8. Если «сила тока хлебопекарной печи – высокая потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение или повысить силу тока в цепи.

9. Если «сопротивление хлебопекарной печи – высокая потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение.

Таблица 12. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной расхода топлива

Параметр	Значение		
	N1	N2	N3
T1	Высокое	Среднее	Высокое
T2	Среднее	Низкое	Среднее
T3	Низкое	Среднее	Низкое

Примечание: T1 – количество теплоты; T2 – объем; T3 – производительность; N1 – медленно; N2 – средне; N3 – быстро.

Делаем, согласно табл. 12, нечеткий логический вывод:

1. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется медленно» – «высокое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расход объема топлива и производительность хлебобулочного изделия.

2. Если «объем хлебопекарной печи расходует медленно» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты в печи или понизить производительность хлебобулочного изделия.

3. Если «производительность хлебопекарной печи расходуется медленно» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты и понизить объем расход топлива в печи.

4. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется средне» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расход объема топлива и производительность хлебобулочного изделия.

5. Если «объем хлебопекарной печи расходует средне» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить производительность хлебобулочного изделия или понизить количество теплоты в печи.

6. Если «производительность хлебопекарной печи расходуется средне» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно понизить количество теплоты и повысить объем расход топлива в печи.

7. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется быстро» – «высокое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расход объема топлива или производительность хлебобулочного изделия.

8. Если «объем хлебопекарной печи расходует быстро» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты или расход объема топлива.

9. Если «производительность хлебопекарной печи расходует быстро» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты или понизить объем расход топлива в печи.

Структура экспертной системы на основе нечеткой модели процесса выпечки представлена на рис. 3.

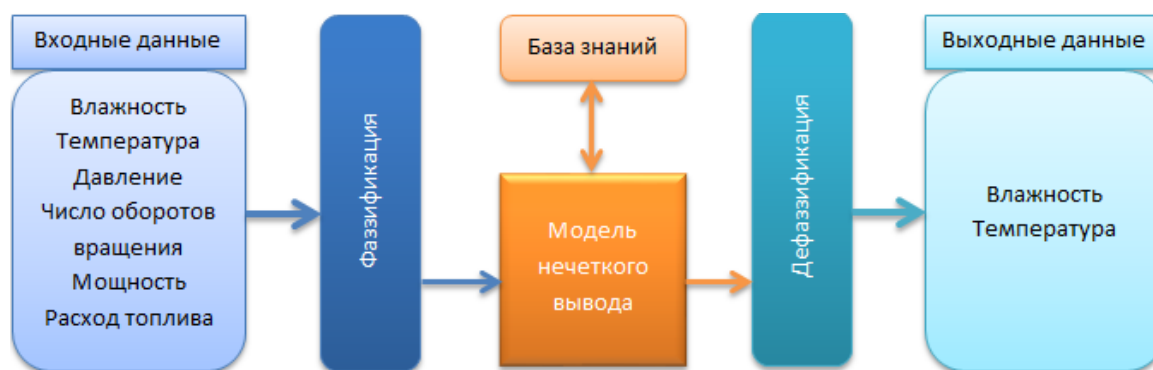


Рис. 3. Блок-схема определения системы управления процессом производства хлебобулочных изделий в малой пекарне

ВЫВОДЫ

Для улучшения показателей качества управления современными технологическими процессами довольно часто необходимы разработка и реализация систем автоматического регулирования, построенных на базе нетиповых законов

регулирования. В ряде случаев на каком-либо из уровней регулирования целесообразно использование регулятора с предсказанием или нечетких регуляторов.

Сравнение результатов экспериментов и результатов работы нечеткой модели управления позволяет сделать вывод, что предлагаемая модель химико-технологических процессов адекватна технологическому процессу (рис. 4).

Результаты исследования:

1. Исходная система: влажность хлебопекарной печи $\rightarrow M(X) = 77$; $D(x) = 1,2$ [13].

2. Модельные расчеты: влажность хлебопекарной печи $\rightarrow M(X) = 78$; $D(X) = 0,7$ [13].

3. Исходная система: температуры хлебопекарной печи $\rightarrow M(X) = 190$; $D(X) = 57$ [13].

4. Модельные расчеты: температуры хлебопекарной печи $\rightarrow M(X) = 205$; $D(X) = 27$ [13].

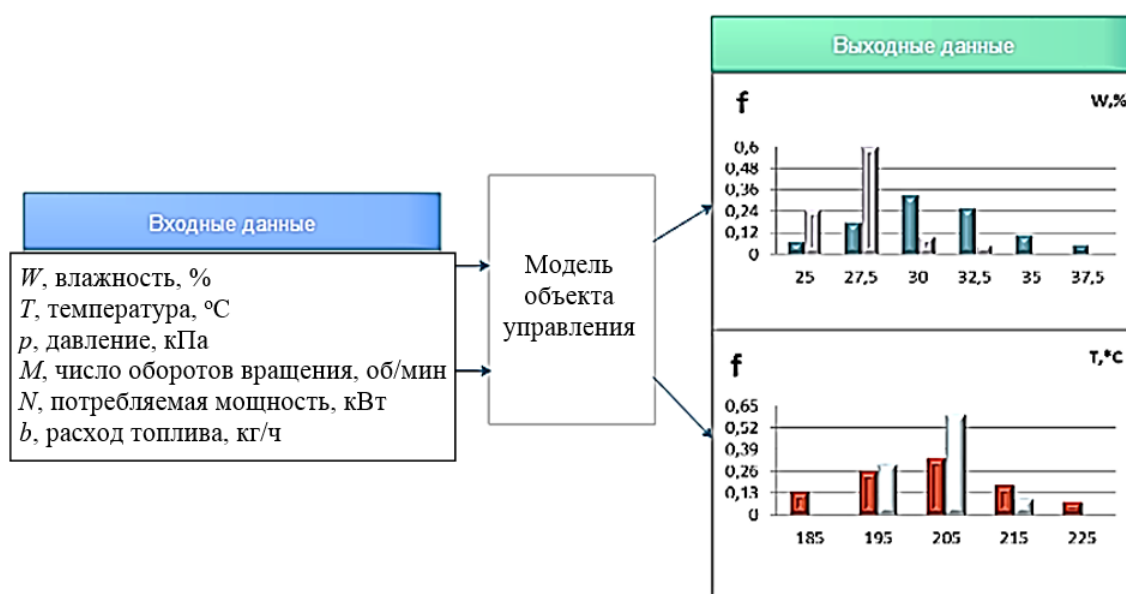


Рис. 4. Проверка нечеткой модели на адекватность:

результаты с реального объекта (■ – влажность; ■ – температура) и результаты, полученные с помощью модели (■ – влажность; ■ – температура)

Основное заключение: нечеткая модель работы процесса может быть применена в экспертной системе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-07-00914

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасова Э.И., Егорычева А.А. Управление качеством хлебобулочных изделий на основе процессного подхода // *Наука без границ*. 2019. № 12 (40). С. 66–70.
2. Ogu E.C., Adekunle Y.A. Basic concepts of expert system shells and an efficient model for knowledge acquisition // *International Journal of Science and Research*. 2013. V. 2. №. 4. P. 554–559.
3. Coffey K., Smith R., Maglaras L., Janicke H. Vulnerability analysis of network scanning on SCADA systems // *Security and Communication Networks*. 2018. V. 2018. 21 p.

4. Балыхин М.Г., Благовещенский И.Г., Борзов А.Б. Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции // *Пищевая промышленность*. 2017. № 11. С. 60–63.
5. Dulova E.V., Kiseleva M.Y., Nasyrova Y.G., Kuzmina S., Prazdnichkova N. Quality and consumer properties of bread baked from mixture of rye and wheat flour using iodine-containing additives // *BIO Web of Conferences*. – *EDP Sciences*. 2020. V. 17. P. 45.
6. Самойлова Е.М., Игнатъев А.А. Интеллектуализация проектирования и мониторинга технологического процесса на основе применения SCADA-системы // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2011. Т. 3. № 2 (58). С. 241–244.
7. Патент РФ 2527298. *Состав для производства хлебобулочных изделий из смеси ржаной и пшеничной муки* / Березина Н.А., Жданова О.В. Заявл. 03.09.2012. Оpubл. 28.08.2014, Бюл. № 24.
8. Bread fermentation methods. URL: <https://www.hengel.com/en/bread-fermentation-methods.html>. (дата обращения: 21.06.2020).
9. Casper H. Statistics Basics - Variance and Standard Deviation // *Statistics*. URL: <https://mlfromscratch.com/statistics-variance-standard-deviation/#/> (дата обращения: 21.06.2020).
10. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства: учебник / под общ. ред. Л.И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2005. 416 с.
11. Ant Z. Production lines for bakery production // *Technological equipment: bakery and pasta*. URL: <https://en.baker-group.net/bread-and-bakery-products/technology-manuals/production-lines-for-bakery-production.html> (дата обращения: 21.06.2020).
12. Математическая статистика: учеб. пособие / под ред. Т.В. Умергалиной. Уфа: УГНТУ, 2016. 92 с.
13. Патент РФ 2544090. *Способ производства специализированного хлеба геродиетического назначения* / Костюченко М.Н., Работкин Ю.В. Шлеленко Л.А. Тюрина О.Е. Борисова А.Е. Якушин М.А. Заявл. 23.05.2012. Оpubл. 10.03.2015, Бюл. № 7.
14. Патент РФ 2345526. *Устройство для замешивания, медленной ферментации и производства тестовой заготовки* / Луазеле М. Заявл. 27.05.2005. Оpubл. 10.02.2009, Бюл. № 4.
15. Bakery Production Equipment. URL: <https://www.readingbakery.com/resources/bakery-production-equipment.html> (дата обращения: 29.06.2020).
16. Патент РФ 2688361. *Устройство для интенсификации охлаждения хлебобулочных изделий* / Кононов А.В., Пахомов В.И., Лобов А.А., Николюк О.И., Давыдов Е.О., Целыковских А.А., Спатлов А.Н., Романчиков С.А. Заявл. 20.09.2018. Оpubл. 21.05.2019, Бюл. № 15.
17. Патент РФ 2564881. *Устройство контроля степени расстойки тестовых заготовок при производстве хлебобулочных изделий* / Брызун В.А., Савекин А.В., Жуланов А.А. Аднодворцев М.Ф. Заявл. 04.04.2014. Оpubл. 10.10.2015, Бюл. № 28.
18. Патент РФ 73593 на полезную модель. *Технологическая линия для производства хлебобулочных изделий в малой пекарне* / Францева Т. П., Прудникова Т.Н. Заявл. 26.02.2008. Оpubл. 27.05.2008, Бюл. № 15.
19. Kulushtayeva B., Nurymkhan G., Smolnikova F., Okuskhanova E., Kozubayeva L., Abilova M., Kisimov B. Technology of production, nutritional value and food safety of gluten free bread // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. V. 7. № 6. P. 1338–1344.
20. Zarandi M.H.F., Mohammadhasan N., Bastani S. A fuzzy rule-based expert system for evaluating intellectual capital // *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. V. 2012. 11 p.

Для цитирования: Аллямшин М.А., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Система контроля качества технологического процесса изготовления хлебобулочных изделий на основе нечетко-логических моделей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 73–87.

QUALITY CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE BAKERY PRODUCTS MANUFACTURE BASED ON FUZZY LOGIC MODELS

M.A. ALLYAMSHIN, P.M. MURASHEV, V.N. BOGATIKOV, Dr. Sc.,

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vnbgtk@mail.ru

The paper considers a fuzzy model of a system for the control of bakery products technology, as one of the tools for use in an expert system for making decisions. On the grounds of the selected parameters the technological process of the manufacture of bakery products in a small bakery is evaluated and the results of experiments and the operation of the fuzzy control model are compared.

Keywords: quality control system; technological process; bakery product; random disturbances; expectation; variance; standard deviation; decomposition of context diagram; context diagram; fuzzy rules

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 20-07-00914

REFERENCES

1. Cherkasova E.I., Egorycheva A.A. Quality management of bakery products based on the process approach. *Nauka bez granits*. 2019. No. 12 (40), pp. 66–70. (In Russian).
2. Ogu E.C., Adekunle Y.A. Basic concepts of expert system shells and an efficient model for knowledge acquisition. *International Journal of Science and Research*. 2013. V. 2. No. 4, pp. 554–559.
3. Coffey K., Smith R., Maglaras L., Janicke H. Vulnerability analysis of network scanning on SCADA systems. *Security and Communication Networks*. 2018. V. 2018. 21 p.
4. Balykhin M.G., Blagoveshchensky I.G., Borzov A.B. Architecture and the basic concept of creating an intelligent expert system for controlling the quality of food products // *Pishcheyaya promyshlennost*. 2017. No. 11, pp. 60–63. (In Russian).
5. Dulova E.V., Kiseleva M.Y., Nasyrova Y.G., Kuzmina S., Prazdnichkova N. Quality and consumer properties of bread baked from mixture of rye and wheat flour using iodine-containing additives. *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*, 2020. V. 17, pp. 45.
6. Samoilova E.M., Ignatiev A.A. Intellectualization of design and monitoring of the technological process based on the application of the SCADA system. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. V. 3. No. 2 (58). pp. 241–244. (In Russian).
7. Patent RF 2527298. *Sostav dlya proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy iz smesi rzhanoy i pshenichnoy muki* [Composition for the production of bakery products from a mixture of rye and wheat flour]. Berezina N.A., Zhdanova O.V. Declared 03.09.2012. Published 28.08.2014, Bulletin No. 24.
8. Bread fermentation methods. URL: <https://www.hengel.com/en/bread-fermentation-methods.html> (date accessed: 21.06.2020).

9. Casper H. Statistics Basics – Variance and Standard Deviation. *Statistics*. URL: <https://mlfromscratch.com/statistics-variance-standard-deviation/#/> (date accessed: 21.06.2020).
10. Auerman L.Ya. Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva: uchebnik [Bakery Technology: Textbook] / ed. L.I. Puchkova. St. Petersburg: Professiya, 2005. 416 p.
11. Ant Z. Production lines for bakery production // Technological equipment: bakery and pasta. URL: <https://en.baker-group.net/bread-and-bakery-products/technology-manuals/production-lines-for-bakery-production.html> (date accessed: 21.06.2020).
12. Matematicheskaya statistika: ucheb. posobiye [Mathematical statistics: textbook] under total. ed. T.V. Umergalina. Ufa: USTU, 2016. 92 p.
13. Patent RF 2544090. *Sposob proizvodstva spetsializirovannogo khleba gerodiyeticheskogo naznacheniya* [Method for the production of specialized bread for gerodietetic purposes]. Kostyuchenko MN, Rabotkin Yu.V. Shlelenko L.A. Tyurina O.E. Borisova A.E., Yakushin M.A. Declared 23.05.2012. Published 10.03.2015, Bulletin No. 7.
14. Patent RF 2345526. *Ustroystvo dlya zameshivaniya, medlennoy fermentatsii i proizvodstva testovoy zagotovki* [A device for kneading, slow fermentation and the production of dough pieces]. Loisele M. Declared 27.05.2005. Published 10.02.2009, Bulletin No. 4.
15. Bakery Production Equipment. URL: <https://www.readingbakery.com/resources/bakery-production-equipment.html> (date accessed: 29.06.2020).
16. Patent RF 2688361. *Ustroystvo dlya intensivifikatsii okhlazhdeniya khlebo-bulochnykh izdeliy* [A device for intensifying the cooling of bakery products]. Kononov A.V., Pakhomov V.I., Lobov A.A., Nikolyuk O.I., Davydov E.O., Tselykovskikh A.A., Spatlov A.N., Romanchikov S.A. Declared 20.09.2018. Published 21.05.2019, Bulletin No. 15.
17. Patent RF 2564881. *Ustroystvo kontrolya stepeni rasstoyki testovykh zagotovok pri proizvodstve khlebobulochnykh izdeliy* [Device for controlling the degree of proofing of dough pieces in the production of bakery products]. Bryazun V.A., Savekin A.V., Zhulanov A.A. Adnodvortsev M.F. Declared 04.04.2014. Published 10.10.2015, Bulletin No. 28.
18. Patent RF 73593 for a utility model. *Tekhnologicheskaya liniya dlya proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy v maloy pekarne* [Technological line for the production of bakery products in a small bakery]. Frantseva T.P., Prudnikova T.N. Declared 26.02.2008. Published 27.05.2008, Bulletin No. 15.
19. Kulushtayeva B., Nurymkhan G., Smolnikova F., Okuskhanova E., Kozubayeva L., Abilova M., Kisimov B. Technology of production, nutritional value and food safety of gluten free bread. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. V. 7. No. 6, pp. 1338–1344.
20. Zarandi M.H.F., Mohammadhasan N., Bastani S. A fuzzy rule-based expert system for evaluating intellectual capital. *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. V. 2012. 11 p.

Поступила в редакцию/received: 26.06.2020; после рецензирования/revised: 07.07.2020;
принята/accepted 05.08.2020