

Здесь:

$$\alpha_{1n} = \alpha_{10} - \ln/f' \text{ – угол дуги покоя ведомого шкива, рад;}$$

$$\alpha_{10} = \pi - (d_1 - d_{2\max})/a_{\min} \text{ – угол дуги обхвата ведомого шкива, рад;}$$

$$F_t = \min F_t = 2T/d_{\max}.$$

При практических расчетах рекомендуется принимать: $\psi = 0,45...0,65$ и $f = 0,34...0,38$.

Для рассматриваемого положения (диски ведомого шкива сдвинуты и $d_{2x} = d_{\max}$) на основании равенств (3.1), (3.2) и (3.3) находим необходимую величину угла наклона паза ψ .

При возрастании технологических сопротивлений замеса теста увеличивается осевая сила регулятора по моменту F_a , действующая со стороны пальца на паз ступицы подвижного диска, равновесие (3.1) нарушится и подвижный диск начнет приближаться к неподвижному, увеличивая передаточное число вариатора, а, следовательно, снижая частоту вращения месильного органа.

Литература

1. Мальцев В.Ф., Ковалев П.А., Аванесьянц А.Г. Определение распорных усилий на дисках шкивов клиноременных передач. // В сб. «Детали машин». – К.: «Техника», – 1974, – № 19.
2. Пронин Б.А., Ревков Г.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы). – М.: Издание 2-е, Машиностроение. – 1967, – 404 с.
3. Заблонский К.И., Шустер А.Е. Плавнорегулируемые передачи. – К.: «Техника», – 1975, – 272 с.

УДК 681.5: 664.723

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СУШКОЙ ЗЕРНА В ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКЕ

Ткачев В.В., д-р техн. наук, профессор, Соснин К.В., ассистент
ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

В статье выполнено моделирование управления сушкой зерна в шахтной зерносушилке при помощи процедуры нечеткого вывода Е. Мамдани. Знания оператора представлены в виде набора правил. Модель управления учитывает параметры качества зерна, в том числе не измеряемые техническими средствами: цвет зерна, запах зерна, качество оболочки зерна.

Modeling of grain-drying control in shaft dryer has been performed by Mamdani's fuzzy inference method. Knowledge of operator are presented as a set of rules. The model of control takes into account grain quality parameters including those not measured by technical equipment: grain's color, smell and quality of grain shell.

Ключевые слова: нечеткие множества, сушка, управление, шахтная зерносушилка.

Введение

Для Украины возрастает значимость продукции агропромышленного комплекса в бюджете страны, зерно становится одной из важнейших составляющих экспорта страны. Зерно после уборки не продают сразу, а после обработки (в том числе сушка) помещают на хранение, ожидая наивысших цен для его реализации. Возрастает важность процесса сушки для сохранения качества собранного зерна на весь период хранения до реализации. Цель сушки зерна – доведение до возможного минимума всех жизнедеятельных процессов зерна при сохранении его как живого организма.

В стране на 96 % предприятий используются шахтные зерносушилки [1], управляемые оператором. Качество высушенного зерна определяется только знанием, опытом и квалификацией оператора. Результаты исследований характеризуют шахтную зерносушилку как многосвязную, распределенную динамическую систему, обладающую значительной инерционностью по каналам управления и транспортным

запаздыванием по каналам преобразования возмущений [2], сложным объектом для эффективного управления [3].

Про сложность автоматизации управления процессом сушки и неопределенность, которая обуславливает применение недетерминированной модели, приведено в [4]. Представляется целесообразным использовать систему управления, которая обучается вырабатывать управляющие воздействия для поддержки принятия решения оператором. Анализ действий оператора показывает, что оценка состояния процесса сушки зерна перед выработкой управляющего воздействия также содержит оценку параметров, которые не измеряются техническими средствами: цвет зерна, запах зерна, качество оболочки зерна и др.

Из анализа публикаций известен нечеткий контроллер [5] для получения выходной влажности при сушке зерна ближе к целевому значению. Нечеткий контроллер представлен двумя входами, и одним выходом. Первый вход это разница между целевой влажностью на выходе и текущей влажностью на выходе (ошибка), второй скорость измерения этой ошибки. Выход управляет скоростью движения зерна через зерносушилку для получения заданной влажности. Для имитации работы зерносушилки использована математическая модель процесса сушки [6]. Нечеткий логический контроллер моделирует управление сушкой для достижения заданной влажности кукурузы на уровне 15 %. Известно исследование [7], использующее нечеткий контроллер для управления сушкой кукурузы. Исследование нацелено на получение выходной влажности кукурузы в районе 15-16 %, с минимизацией потерь при сушке. Авторы статьи [8] предлагают адаптивный нечеткий логический контроллер для управления режимом сушки риса ближе к заданным значениям. Разработанная система обеспечивает целевое значение влажности риса, а также эффективное энергопотребление. Применение экспериментальных методов исследования непосредственно в производственных условиях на зерносушилке, оборудованной необходимыми измерительными устройствами (натурные модели) ограничено. Такие исследования требуют длительного времени, больших затрат средств и не всегда позволяют решить задачу совершенствования производственных процессов. Совершенствование систем управления процессом сушки зерна легче решать методами математического моделирования сравнивая полученный результат с натурным экспериментом.

Постановка задачи

При помощи пакета Fuzzy интегрированной среды MATLAB выполнить моделирование процесса управления сушкой зерна пшеницы в зерносушилке ДСП-32 на основании знаний оператора, изложенных в виде правил. Аппарат нечетких множеств использовать для учета показателей качества зерна пшеницы, включающих такие показатели как запах зерна, качество оболочки зерна, цвет зерна.

Методы и алгоритмы нечеткой логики

Знания оператора по управлению сушкой зерна в зерносушилке шахтного типа ДСП-32, формулируются в виде правил, связывающих входы $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выходы $Y (y_1, y_2, \dots, y_n)$ в форме продукционной системы «Если-ТО».

Для моделирования системы при помощи нечетких множеств использован алгоритм Е. Мамдани [9].

1. Процедура фазы фиксации определяет значения функции принадлежности для каждого правила.
2. Нечеткий вывод. Определяются уровни от сечения для левой части каждого правила. В качестве t -нормы выступает логический минимум (\min).
3. Объединение усеченных функций. С использованием операции максимум (\max) производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности.
4. Процедуру (дефазификации) преобразования нечеткого множества в число можно выполнить разными методами. Matlab предоставляет ниже представленные методы.
 - 4.1. Метод центра тяжести (centroid), где четкое значение выходной переменной определяется как центр тяжести для кривой (области) на плоскости $\mu(y)$.
 - 4.2. Метод двух секторов (bisector). Четкое значение выходной переменной делит область функции принадлежности $\mu(y)$ на две равные подобласти. Иногда, но не всегда, совпадает с методом центра тяжести.
 - 4.3. Метод среднего максимума (middle of maximum (mom)). Четкое значение выходной переменной находится по середине всех элементов имеющих максимальную степень принадлежности.
 - 4.4. Метод левого (Small of maximum (som)), правого (Large of maximum (lom)) максимума.

Выбирается наименьший или наибольший элемент нечеткого множества среди всех элементов имеющих максимальную степень принадлежности.

Моделирование процесса управления сушкой зерна

Параметры качества зерна, контролируемые при сушке формализуются множеством параметров согласно ГОСТ на данную культуру и инструкции по сушке зерна [10]. Параметрическая схема процесса сушки зерна представлена на рисунке 1. В качестве возмущающих входных переменных системы

нечеткого вывода моделирующего сушку пшеницы в шахтной зерносушилке ДСП-32 будем рассматривать 8 лингвистических переменных (ЛП): $K_3V_{\text{вх}}$ — влажность зерна; $K_3ЗАП_{\text{вх}}$ — запах зерна, т.е. наличие запаха дыма, сернистого газа, жидкого топлива; $K_3Ц_{\text{вх}}$ — цвет зерна; $K_3КО_{\text{вх}}$ — качество оболочки зерна (потемнение, подгорание, растрескиваемость оболочки, налет копоти, запаренность зерна с сырой оболочкой); $K_3ЗАР_{\text{вх}}$ — зараженность; $K_3ПС1_{\text{вх}}$ — примесь сорная, в том числе испорченные зерна, наличие битых, обрушенных зерен, крошащийся эндосперм; $K_3ККЛ_{\text{вх}}$ — количество сырой клейковины; $K_3ККЧ_{\text{вх}}$ — качество клейковины. В качестве управляемых параметров системы нечеткого вывода для случая сушки пшеницы будем рассматривать 3 нечетких лингвистических переменных: «Скорость (расход) зерна» (« C_3 »), «Температура сушильного агента. На входе в сушильную шахту первой зоны» (« $T_{\text{аг.1}}$ »), «Температура сушильного агента. На входе в сушильную шахту второй зоны» (« $T_{\text{аг.2}}$ »).

В качестве выходных параметров выступают 9 лингвистических переменных: T_3 — температура зерна на выходе второй зоны нагрева; $K_3V_{\text{вых}}$ — влажность зерна; $\text{откл.}K_3ЗАП_{\text{вых}}$ — отклонение запаха зерна, т.е. наличие запаха дыма, сернистого газа, жидкого топлива; $\text{откл.}K_3Ц_{\text{вых}}$ — отклонение цвета зерна; $\text{откл.}K_3КО_{\text{вых}}$ — отклонение качества оболочки зерна (потемнение, подгорание, растрескиваемость оболочки, налет копоти, запаренность зерна с сырой оболочкой); $K_3ЗАР_{\text{вых}}$ — зараженность; $K_3ПС1_{\text{вых}}$ — примесь сорная, в том числе испорченные зерна, наличие битых, обрушенных зерен, крошащийся эндосперм; $K_3ККЛ_{\text{вых}}$ — количество сырой клейковины; $K_3ККЧ_{\text{вых}}$ — качество клейковины.

Неконтролируемые возмущающие воздействия сокращенно обозначены: $P_{\text{аг}}$ — расход агента сушки по зонам; $V_{\text{аг}}$ — влагосодержание агента сушки; $T_{\text{воз}}$, $D_{\text{воз}}$ — температура, давление воздуха; $X_{\text{суш.}}$ — изменение характеристик зерносушилки вследствие износа.

В качестве терм-множеств, входных лингвистических переменных, будем использовать множества: $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$. 1-ая ЛП: «Влажность исходного зерна» (« $K_3V_{\text{вх}}$ ») будем использовать множество $T_1 = \{\text{«сухое» («dry») — не более 14,0 \%, «средней сухости» («average dry») — 14,1 \div 15,5 \%, «влажное» («wet») — 15,6 \div 17,0 \%, «сырое» («raw») — 17,1 \% и более}\}$.

2-ая ЛП: «Запах зерна» (« $K_3ЗАП_{\text{вх}}$ ») Наличие запаха дыма, сернистого газа, жидкого топлива. Будем использовать множество $T_2 = \{\text{«запах не ощущается (отсутствует)» — от 0 до 1, «запах сразу не ощущается, но обнаруживается при тщательном исследовании (нагревании)» — от 1,1 до 2, «запах замечается если обратить внимание» — от 2,1 до 3, «запах легко замечается и вызывает неодобрительный отзыв» — от 3,1 до 4, «запах обращает на себя внимание» — от 4,1 до 5}\}$.

3-ая ЛП: «Цвет зерна» (« $K_3Ц_{\text{вх}}$ »). Будем использовать множество $T_3 = \{\text{«отклонения цвета не замечается (отсутствует)» — от 0 до 1, «отклонения цвета сразу не замечается, но обнаруживается при тщательном исследовании (в лабораторных условиях)» — от 1,1 до 2, «отклонение цвета заметно, если обратить внимание;» — от 2,1 до 3, «отклонение цвета легко замечается и вызывает неодобрительный отзыв» — от 3,1 до 4, «отклонение цвета обращает на себя внимание» — от 4,1 до 5}\}$.

4-ая ЛП: «Качество оболочки зерна» (« $\text{откл.}K_3КО_{\text{вх}}$ »). Будем использовать множество $T_4 = \{\text{«отклонения качества оболочки не замечается (отсутствует)» — от 0 до 1, «отклонение качества оболочки сразу не замечается, но обнаруживается при тщательном исследовании (в лабораторных условиях)» — от 1,1 до 2, «отклонение качества оболочки замечается если обратить внимание» — от 2,1 до 3, «отклонение качества оболочки легко замечается и вызывает неодобрительный отзыв» — от 3,1 до 4, «отклонение качества оболочки обращает на себя внимание» — от 4,1 до 5}\}$.



Рис. 1 – Параметрическая схема процесса сушки зерна пшеницы

5-ая ЛП: «Зараженность» (« $K_3ЗАР_{\text{вх}}$ ») в % будем использовать множество $T_5 = \{\text{«класс 1» («cl#1») — не более 0,2 \%, «класс 2» («cl#2») — не более 0,3 \%, «класс 3» («cl#3») — не более 0,5 \%, «класс 4» («cl#4») — не более 0,5 \%, «класс 5» («cl#5») — не более 0,5 \%, «класс 6» («cl#6») — не более 0,5 \%}\}$.

6-ая ЛП: «Примесь сорная. Испорченные зерна» (« $K_3PC1_{вх}$ ») в % будем использовать множество $T_6 = \{\text{класс 1} \text{ («cl\#1») – не более 0,2 \%, «класс 2» («cl\#2») – не более 0,2 \%, «класс 3» («cl\#3») – не более 0,5 \%, «класс 4» («cl\#4») – не более 0,5 \%, «класс 5» («cl\#5») – не более 1,0 \%, «класс 6» («cl\#6») – не более 1,0 \% \}$.

7-ая ЛП: «Количество сырой клейковины» (« $K_3KKL_{вх}$ ») в % будем использовать множество $T_7 = \{\text{класс 1} \text{ («cl\#1») – не менее 30 \%, «класс 2» («cl\#2») – не менее 27 \%, «класс 3» («cl\#3») – не менее 23 \%, «класс 4» («cl\#4») – не менее 18 \%, «класс 5» («cl\#5») – не менее 18 \%, «класс 6» («cl\#6») – не ограничивается \}$.

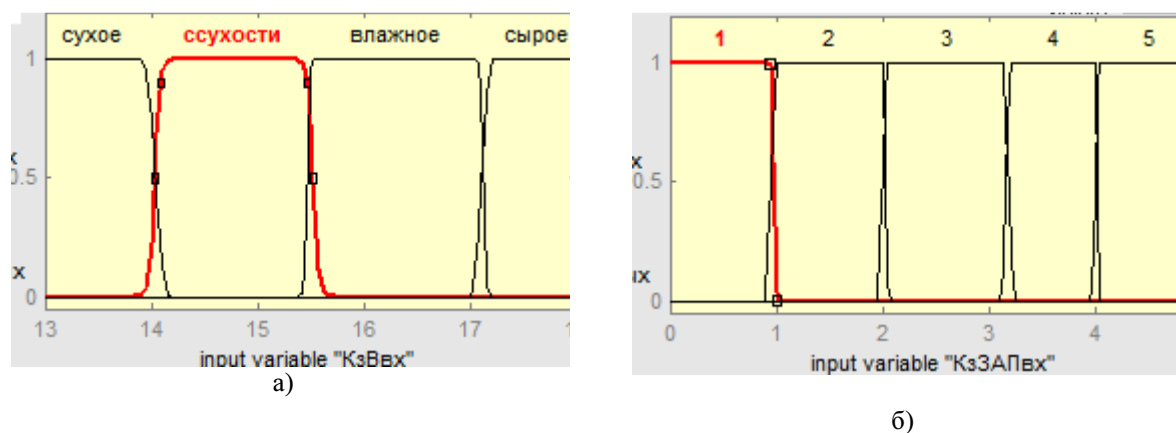
8-ая ЛП: «Качество клейковины» (« $K_3KKч_{вх}$ ») в единицах прибора ИДК будем использовать множество $T_8 = \{\text{класс 1} \text{ («cl\#1») – } 45 \div 75 \text{ ед., «класс 2» («cl\#2») – } 45 \div 100 \text{ ед., «класс 3» («cl\#3») – } 45 \div 100 \text{ ед., «класс 4» («cl\#4») – } 20 \div 100 \text{ ед., «класс 5» («cl\#5») – } 20 \div 100 \text{ ед., «класс 6» («cl\#6») – не ограничивается \}$.

В качестве терм-множеств управляющих лингвистических переменных будем использовать множества: T_9, T_{10}, T_{11} . 9-ая ЛП: «Скорость движения зерна в сушилке» (« C_3 ») будем использовать параметр интервал между срабатываниями затворной рамы представленный в виде множества $T_9 = \{\text{«Наименьший» («VerySmall»), «Малый» («Small»), «Средний» («Middle»), «Высокий» («High») \}$. Производится оценка по 90 бальной шкале, при которой цифре 11 соответствует наименьшая оценка, а цифре 90 наивысшая оценка.

10-ая ЛП: «Температура сушильного агента. На входе в сушильную шахту первой зоны» (« $T_{аз.1}$ ») будем использовать множество $T_{10} = \{\text{«Малый» («Small») – } 80 \div 105 \text{ }^\circ\text{C, «Средний» («Middle») – } 95 \div 125 \text{ }^\circ\text{C, «превышает среднее» («Above Middle») – } 120 \div 145 \text{ }^\circ\text{C и выше \}$.

11-ая ЛП: «Температура сушильного агента. На входе в сушильную шахту первой зоны» (« $T_{аз.2}$ ») будем использовать множество $T_{11} = \{\text{«Средний» («Middle») – } 105 \div 135 \text{ }^\circ\text{C, «превышает среднее» («Above Middle») – } 130 \div 165 \text{ }^\circ\text{C \}$.

Не приводятся терм-множества выходных лингвистических переменных, поскольку диапазоны функций принадлежности соответствуют входным лингвистическим переменным. Для решения задачи фазификации и дефазификации выбраны трапециевидные функции принадлежности. Графическое представление (интерпретация) функций принадлежности для некоторых лингвистических переменных представлено на рис. 2.



а) «Влажность исходного зерна» (« $K_3B_{вх}$ »). б) «Запах зерна» (« $K_3ЗАП_{вх}$ »)

Рис. 2 – Графическая интерпретация функций принадлежности для лингвистических переменных

Знания оператора по управлению сушкой зерна пшеницы в зерносушилке ДСП-32 представлены виде совокупности правил (табл.1). Представленные правила интегрально отражают мнения разных операторов (экспертов), позволяют приближенно, в рамках заданных функций принадлежности, моделировать управление процессом сушки.

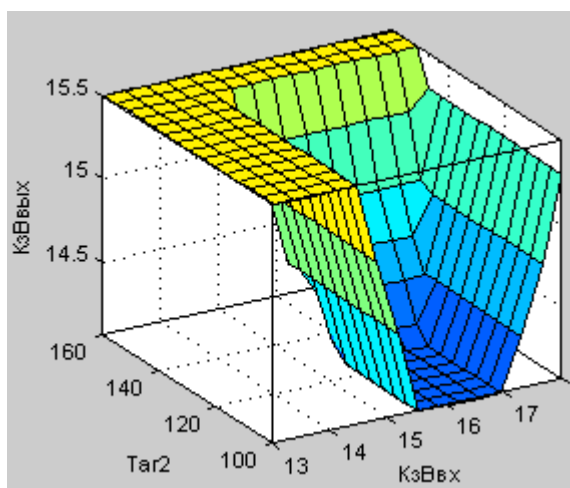
Графически некоторые результаты моделирования сушки зерна представлены на рис. 3 в аксонометрическом виде. Из рисунка 3а видно, что влажность зерна на выходе зерносушилки не превышает 14 (%) **если** «Влажность исходного зерна» (« $K_3B_{вх}$ ») соответствует диапазону 15.6÷17,0 (%) «влажное» («wet») **и** «Температура сушильного агента. На входе в сушильную шахту первой зоны» (« $T_{аз.2}$ ») в диапазоне 105÷135 (°C) т.е. соответствует диапазону «Средний» («Middle»). Из рисунка 3б видно, что возможно ухудшение качества оболочки зерна до значения «отклонение качества оболочки замечается, если обратить внимание» – от 2,1 до 3 **если** повысить значения переменной «Температура сушильного агента. На входе

в сушильную шахту первой зоны» (« $T_{ac.1}$ ») и снизить значение переменной скорость движения зерна в сушилке (« C_3 »).

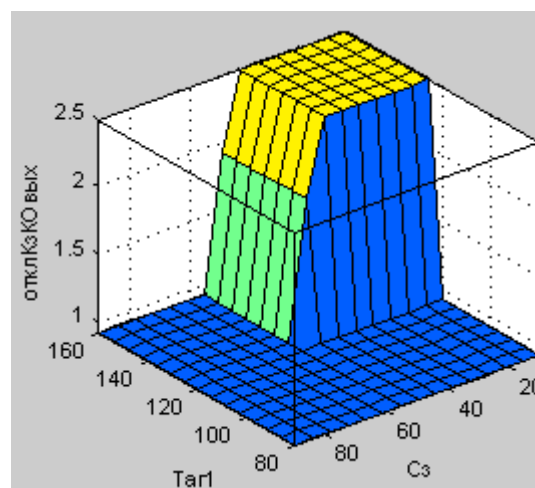
Таблица 1 – Продукционная база знаний

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	K_3B_{BX}	K_3Zan_{6X}	$K_3Ц_{BX}$	K_3KO_{6X}	K_3ZAP_{BX}	$K_3ЛC1_{6X}$	$K_3KKЛ_{BX}$	$K_3KKЧ_{BX}$	$T_{ac.1}$	$T_{ac.2}$	C_3
1	AD	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1	S	M	S
2	W	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1	M	M	M
3	R	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1	AM	AM	S
4	W	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1	AM	AM	VS
5	W	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1	M	M	H

№	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	T_3	K_3B_{BIX}	откл. K_3ZAP_{BIX}	откл. $K_3Ц_{BIX}$	откл. K_3KO_{BIX}	K_3ZAP_{BIX}	$K_3ЛC1_{6BX}$	$K_3KKЛ_{BIX}$	$K_3KKЧ_{BIX}$
1	S	D	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1
2	S	D	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1
3	S	D	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1
4	AS	D	1,5	2,5	2,5	cl#2	cl#3	cl#2	cl#2
5	S	AD	0,5	0,5	0,5	cl#2	cl#2	cl#1	cl#1



а)



б)

Рис.3 – Аксонометрическое представление результатов моделирования сушки зерна

Вопрос подобия (адекватности) модели рассмотрен в таблице 2, где выборка из процесса сушки в условиях предприятия (натурный эксперимент) сравнивается с результатом математического моделирования при разных методах дефазификации. Видно, что применение трех методов дефазификации (centroid, bisector, mom) дает одинаковый результат, который не отличается от значений выборки из процесса сушки на предприятии.

Математическое моделирование управления сушкой зерна в зерносушилках шахтного типа рассмотрено для повышения эффективности сушки зерна путем совершенствования системы управления. Особенностью моделирования является использование не только параметров влажности и температуры зерна, но и таких параметров качества зерна необходимых для контроля [8] при сушке, которые невозможно измерить техническими средствами. Повышение точности моделирования достигается путем уточнения цели моделирования на всех этапах алгоритма нечеткого вывода. К недостаткам выполненного моделирования можно отнести неполноту правил даже для одной культуры (представленные правила сушки соответствуют данному качеству пшеницы), зависимость конечного результата моделирования от выбранного метода дефазификации. Формализованные знания по управлению сушкой зерна, представленные в виде базы правил, моделируют процесс управления, что позволяет реализовать недетерминированный регулятор управления.

Таблиця 2 – Адекватність методів дефазифікації натурному експерименту

Параметр	Натурний експеримент					
$K_3 V_{BX}, \%$	16,1					
$K_3 Zan_{BX}$	0,5 (0÷1)					
$K_3 Ц_{BX}$	0,4 (0÷1)					
$K_3 KO_{BX}$	0,5 (0÷1)					
$K_3 ZAP_{BX}, \%$	0,3					
$K_3 ПС1_{BX}, \%$	0,2					
$K_3 ККЛ_{BX}, \%$	35					
$K_3 ККЧ_{BX}, ед$	50 (45÷75)					
$T_{ag.1}, ^\circ C$	108					
$T_{ag.2}, ^\circ C$	117					
C_3, c	44					
Метод дефазифікації						
Параметр	Нат. експеримент	centroid	bisector	mom	som	lom
T_3	41	42,5	42,4	42,4	36	48,8
$K_3 V_{ВЫХ}, \%$	13,9	13,6	13,6	13,6	13	14,1
$откл_{откл} K_3 ZAP_{ВЫХ}$	(0÷1)	0,49	0,5	0,5	0	0,9
$откл_{откл} K_3 Ц_{ВЫХ}$	(0÷1)	0,49	0,5	0,5	0	0,8
$откл_{откл} K_3 KO_{ВЫХ}$	(0÷1)	0,49	0,5	0,5	0	0,9
$K_3 ZAP_{ВЫХ}, \%$	0,3	0,25	0,25	0,25	0,2	0,29
$K_3 ПС1_{ВЫХ}, \%$	0,2	0,15	0,15	0,15	0,1	0,2
$K_3 ККЛ_{ВЫХ}, \%$	35	35	35	35	30	40
$K_3 ККЧ_{ВЫХ}, ед.$	50	60	60	60	45	75
ИДК						

Выводы

Выполнено построение модели процесса управления сушкой зерна в зерносушилке ДСП-32 при помощи процедуры нечеткого вывода Е. Мамдани в пакете Fuzzy интегрированной среды MATLAB. При изменении метода дефазификации числовые значения выходных лингвистических переменных изменяются в интервалах заданных терм-множеств, результат применения трех методов дефазификации (centroid, bisector, mom) совпадает. Выбор нечетких множеств для моделирования, позволяет учитывать параметры качества, не измеряемые техническими средствами (запах, цвет, качество оболочки зерна и др.), которые легко оцениваются человеком.

Благодарность

Выражаем благодарность Государственному научно-производственному предприятию «Эльдорадо» за помощь в организации натурального эксперимента.

Литература

1. Рыбчинский Р.С. Состояние и перспективы развития элеваторных мощностей в хозяйствах Украины // Хранение и переработка зерна. – 2012. – №5(155). – С. 12–18.
2. Андрианов Н.М. Математическое моделирование динамических характеристик зерновых сушилок: сб. науч. тр. / СПб.: 2006. – С. 5–13.
3. Хобин В.А., Совершенствование систем автоматического управления режимами работы зерносушилок как основа повышения их эффективности // «Хранение и переработка зерна». – № 4(70). – 2005. – С. 41–44.
4. Автоматизация процесса сушки зерна в шахтных зерносушилках на основе теории нечетких множеств. Соснин К.В., Просянык А.В. // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – № 36, Т.2. – С. 179–186.
5. H. Mansor, S.B. Mohd Noor, R.K. Raja Ahmad, F.S. Taip and O.F. Lutfy. Intelligent control of grain frying process using fuzzy logic controller // Journal of Food, Agriculture & Environment. 2010. – Vol. 8(2). – P. 145–149.
6. Lui Q. and F.W. Bakker-Arkema, Automatic control of cross-flow grain dryers. Part1: Development of a process model // [Journal of Agricultural Engineering Research](#). – 2001. – Vol. 80(2). – P. 173–181.
7. Zhang Q., J.B. Litchfield, Knowledge representation in a grain drier fuzzy logic controller // [Journal of Agricultural Engineering Research](#). – April. 1994. – Vol. 57(4), – P. 269–278.

8. [Atthajariyakul S. and Leephakpreeda, Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control // Journal of food engineering. – 2006. – Vol. 75\(1\). – P. 104–114.](#)
9. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
10. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок. Г.М. Станкевич, О.І. Шаповаленко, Т.В. Страхова, Б.М. Петруня, А.І. Яковенко, М.В. Остапчук, А.Б. Шашкін. – Одеса–Київ: ДАК «Хліб України». – 1997. – 72 с.

УДК 536.46+534.222.2+664.7

ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СИЛОСА

Волков В.Э., д-р техн. наук, доцент

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Создана программа оценки взрывоопасности силоса. Произведенные расчеты демонстрируют, что железобетонные силосы более взрывобезопасны в сравнении с металлическими.

Program for estimate of explosion hazard for silo is created. Calculations demonstrate that ferro-concrete silo is more explosive-safe than the metal one.

Ключевые слова: взрыв, взрывоопасность, пылевоздушная смесь, силос, программа.

Проблема взрывобезопасности силосов представляется актуальной, так как согласно данным [1,2] распределение взрывов пылевоздушной смеси (ПВС) на предприятиях по хранению и переработке зерна по месту возникновения таково, что на силосы и бункера приходится почти половина от общего числа взрывов (Таблица 1), т.е. именно силосы и бункера представляют собой наиболее взрывоопасные элементы в системе зерновых и комбикормовых производств. При загрузке и гравитационной разгрузке силосов в их свободных объемах образуется ПВС, способная воспламениться и гореть [1]. На стенках бункеров и силосов может оседать и накапливаться в значительных количествах мелкодисперсная сухая пыль, которая при внешних возмущениях быстро переходит во взвешенное состояние, также создавая взрывоопасную ПВС [1]. Взрыв в силосе приводит к тяжелым последствиям, так как при этом часто разрушаются боковые стенки и перекрытия, деформируется и разрывается выпускной конус под действием давления взрыва [2]. Кроме того, при взрыве в силосе возможен выброс горячей смеси и продуктов взрывного горения в над- и подсилосный этажи [2].

Таблица 1 – Распределение взрывов ПВС на зерновых предприятиях по месту возникновения [2]

Место возникновения взрыва	Количество взрывов в % от общего числа
Силосы и бункера	47,7
Нории и конвейеры	21,0
Аспирационные системы, пневмотранспорт	6,7
Дробилки, вальцовые станки	4,1
Зерносушилки	6,1
Производственные и другие помещения	4
Место не установлено	10

Под силосом понимается вертикальная цилиндрическая или призматическая емкость, предназначенная для хранения сыпучего материала. При этом высота от верха воронки или набетонки (забутки) до низа надсилосного перекрытия должна быть, как правило, более $1,5\sqrt{A}$ (где A – площадь горизонтального сечения силоса) [3].

Силосы можно разделить на [3]:

- отдельно стоящие;
- входящие в состав силосных корпусов.

Нет никаких различий при оценке взрывоопасности отдельно стоящего силоса и такого же (отдельно взятого) силоса в составе силосного корпуса, хотя вероятность взрыва в последнем все же выше, так как взрыв в нем может произойти не по внутренним причинам, а как следствие взрыва в соседнем силосе, т.е. по причинам внешнего характера.

По характеру материала, из которого изготовлены силосы их можно разделить на [3]: