

Подгорный Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент Кубанского государственного технологического университета;

Блягоз Хазрет Рамазанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, ректор Майкопского государственного технологического университета, т.: 8(8772)570011;

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, т.: 88612752279;

Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, т.: 88612752279;

Схляхов Анзаур Адамович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета Майкопского государственного технологического университета, т.: 8(8772)570412.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ РАВНОВЕСИЙ ВЛАГИ В ЗЕРНЕ ПШЕНИЦЫ (рецензирована)

Использование модельных представлений позволяет значительно увеличить качество описания связи влажности материала с потенциалом влаги в материале. Данная работа посвящена сравнительной оценке моделей равновесий влаги в зерне пшеницы. Цель работы – выбор наиболее информативной модели потенциала влаги в материале.

Ключевые слова: равновесия влаги, сравнительная оценка, зерно пшеницы, модели, влажность материала.

Podgorny Sergey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Kuban State Technological University;

Blyagoz Khazret Ramazanovich, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Technology, Machinery and Equipment of Food Production, rector of Maikop State Technological University, tel: 88772570011;

Koshevoi Eugene Panteleevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Machines and Apparatus of Food Production, Kuban State Technological University, tel: 88612752279;

Kosachev Vyacheslav Stepanovich, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Machines and Apparatus of Food Production, Kuban State Technological University, tel: 88612752279;

Skhalyakhov Anzaur Adamovich, Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the Department of Technology, Machinery and Equipment of Food Production, dean of the Faculty of Technology of Maikop State Technological University, tel: 88772570412.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF EQUILIBRIUM MODELS OF MOISTURE CONTENT IN WHEAT (reviewed)

Using the model assumptions can significantly increase the quality of the description of the material moisture due to the potential of moisture in the material. This work is devoted to a comparative evaluation of models of equilibrium moisture content in wheat. The purpose - to choose the most informative model of moisture in building materials.

Keywords: balance of moisture, a comparative evaluation, wheat, models, material moisture.

Цель работы – выбор наиболее лучшей модели равновесия влаги в материале, на основе которой можно получить наиболее информативную модель потенциала влаги в зерне.

Проведен сравнительный анализ статистических методов [1] двух и трехпараметрических моделей, рассмотренных в работе [2] (GAB и MGAB – уравнение Guggenheim, Anderson, de Boer и его модификация; MOE – модифицированное уравнение Oswin; MHDE – модифицированное уравнение Henderson; MCE – модифицированное уравнение Chung-Pfost), в которых зависимость влажности является функцией активности.

Анализ этих моделей основан на выделении компромиссного множества вариантов, наиболее полно характеризующих полученный объем данных по адекватности исследуемых моделей по различным выражениям для функции ошибок, которые обоснованы и использованы ранее в работах [3, 4]. Исходными

данными в этом случае являются варианты оценок в рамках моделей, которые хотя бы по одному из оценочных критериев превосходят остальные.

Для применения принципа Парето [5] доминирования двухпараметрических моделей ввели шкальную оценку критериев на основе функции желательности нормированной на интервале значений каждого критерия от одного (наихудший) до трех (наилучший) значения.

Для трехпараметрических моделей ввели шкальную оценку критериев на основе функции желательности нормированной на интервале значений каждого критерия от одного (наихудший) до пяти (наилучший) значения. В качестве критериев использовались минимум суммы стандартных отклонений между модельным и экспериментальным потенциалом ($\Sigma\sigma_{\Theta}^{\min}$), минимальное значение квадрата, отсекаемого отрезка между модельным и экспериментальным потенциалом (a_{Θ})²_{min}, коэффициент корреляции между модельным и экспериментальным потенциалом (r_{Θ}) и коэффициент наклона прямой между модельным и экспериментальным потенциалом (b_{Θ}).

Наличие нескольких параметров в модели позволяет значительно увеличить адекватность модели эксперименту. В тоже время существенной разницы в описании экспериментальных данных двух и трех параметрических моделях выявлено не было. Поэтому рассмотрим несколько трехпараметрических моделей, определим компромиссное множество по множеству критериев, использующих различные целевые функции повышающие адекватность этих моделей.

Вначале рассмотрим несколько трехпараметрических моделей, определим компромиссное множество по множеству критериев, использующих различные целевые функции повышающие адекватность этих моделей.

Модель на основе модифицированного уравнения MHDE:

$$u_{TA} = \sqrt[c]{\frac{\ln(1 - A_{MHDE})}{(-a) \cdot (T_w + b)}} \quad (1)$$

Модель на основе модифицированного уравнения MOE:

$$u_{TA} = (a + b \cdot T_w) \cdot \left(\frac{A_{MOE}}{1 - A_{MOE}} \right)^c \quad (2)$$

Модель на основе уравнения GAB:

$$u_{TA} = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot A_{GAB}}{(1 - c \cdot A_{GAB}) \cdot (1 - c \cdot A_{GAB} + b \cdot c \cdot A_{GAB})} \quad (3)$$

Модель на основе модифицированного уравнения MGAB:

$$u_{TA} = \frac{a \cdot b \cdot \left(\frac{c}{T_w} \right) \cdot A_{MGAB}}{(1 - b \cdot A_{MGAB}) \cdot \left[1 - b \cdot A_{MGAB} + b \cdot \left(\frac{c}{T_w} \right) \cdot A_{MGAB} \right]} \quad (4)$$

Модель на основе уравнения MCE:

$$u_{TA} = \left(-\frac{1}{c} \right) \cdot \ln \left[\frac{(T_w + b) \cdot \ln(A_{MCE})}{(-a)} \right] \quad (5)$$

Оптимальность по Парето в задачах рационального выбора – свойство альтернатив, которое обычно признается необходимым для решения в случае многокритериальности. Применительно к анализу трехпараметрических моделей это выделение компромиссного множества вариантов наиболее полно характеризующих полученный объем данных по адекватности исследуемых моделей.

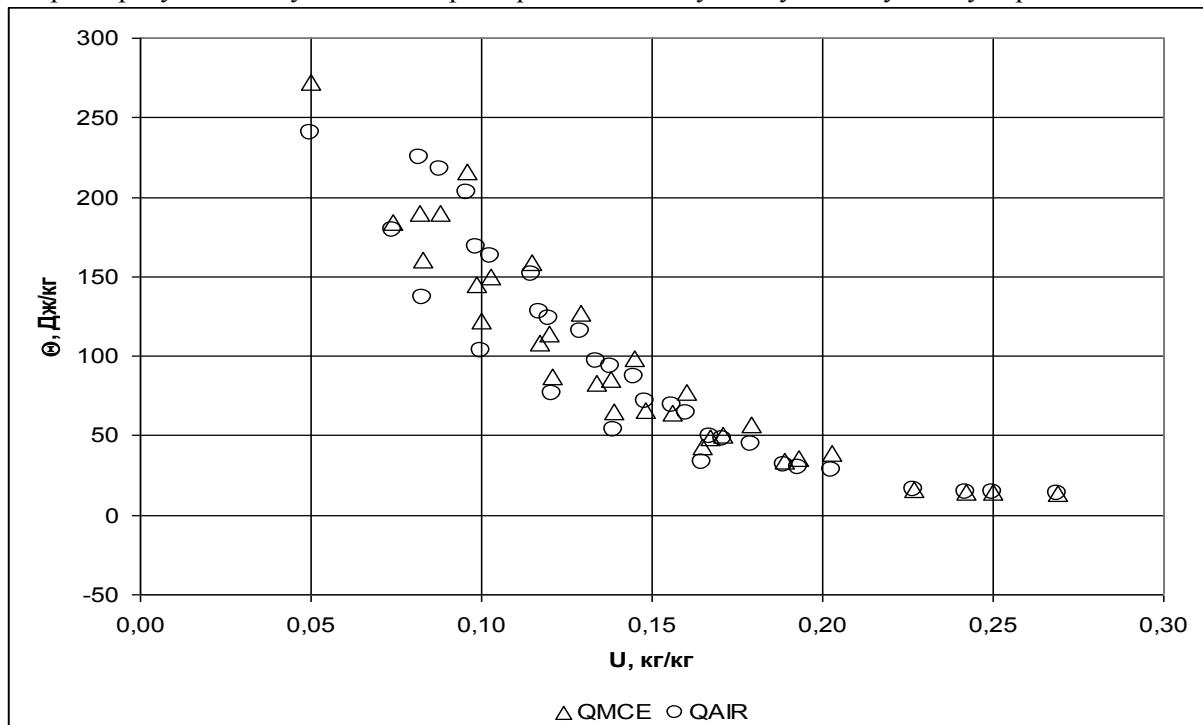
Исходными данными в данном случае являются варианты оценок в рамках моделей, которые хотя бы по одному из оценочных критериев превосходят остальные. Для применения Парето доминирования введем шкальную оценку критериев на основе функции желательности нормированной на интервале значений каждого критерия от одного (наихудший) до трех (наилучший) значения.

Таблица 1 - Доминированное по Парето подмножество трехпараметрических моделей

Модель	Z_f	$\Sigma\sigma_\Theta$	$(a_\Theta)^2$	b_Θ	r_Θ
MHDE	Z_{MPS}	463	248	0,843	0,918
MHDE	Z_{SAE}	456	153	0,84	0,917
MHDE	Z_{ARE}	465	73	0,824	0,917
MHDE	Z_{CDS}	417	482	0,889	0,958
MHDE	Z_{HFE}	376	31	0,885	0,944
MOE	Z_{CDS}	654	2292	0,768	0,973
MOE	Z_{MPS}	281	62	0,935	0,967
MOE	Z_{HFE}	377	1	0,876	0,95
MOE	Z_{SAE}	272	64	0,934	0,967
GAB	Z_{CDS}	531	81	0,775	0,902
GAB	Z_{MPS}	498	296	0,81	0,9
MGAB	Z_{CDS}	698	2226	0,736	0,927
MGAB	Z_{SSE}	572	7	0,733	0,936
MCE	Z_{CDS}	358	347	0,925	0,978
MCE	Z_{MPS}	258	33	0,952	0,976
MCE	Z_{HFE}	250	6	0,948	0,974
MCE	Z_{SAE}	248	15	0,95	0,975

Как видно из представленных данных, наилучшим сочетанием критериев отвечает модель MCE, использующая целевые функции Z_{MPS} и Z_{CDS} .

Как видно из представленных графиков (рисунок 1 и рисунок 2) наиболее информативной является модель соответствующая последнему из представленных вариантов, так как она более адекватна по критерию Фишера. С точки зрения набора оценочных критериев компромиссное множество трехпараметрических моделей характеризуется следующим набором границ по наилучшему и наихудшему вариантам.

Рис. 1. Модель MCE критерий Z_{MPS} , $F_{инф} = 603$

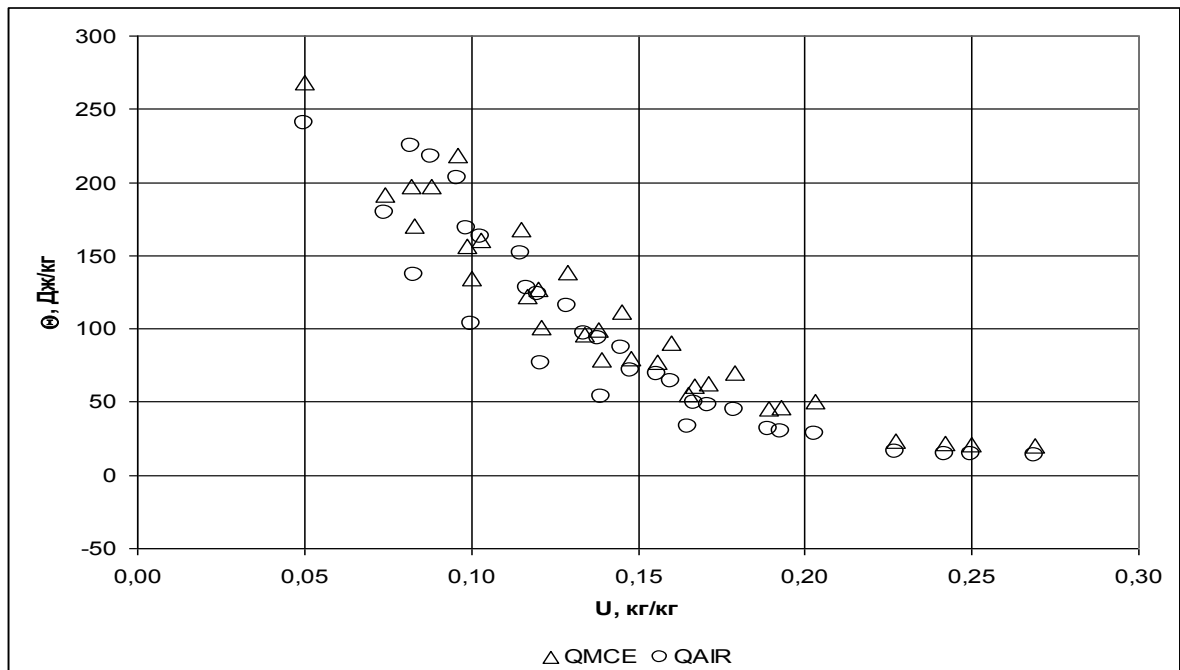


Рис. 2. Модель MCE критерий Z_{CDS} , $F_{inf} = 645$

Таблица 2 - Границы оценочных критериев компромиссного по Парето подмножества трехпараметрических моделей

Вариант	$\Sigma\sigma_{\Theta}$	$(a_{\Theta})^2$	b_{Θ}	r_{Θ}
Наилучший	258	33	0,952	0,978
Наихудший	358	347	0,925	0,976

Представленные выше данные (таблица 2) позволяют не только оценить качество множества рассмотренных трехпараметрических моделей, но и сравнить их с двухпараметрическими моделями.

Рассмотрим несколько двухпараметрических моделей, как и в предыдущем случае, определим компромиссное множество по множеству критериев использующих различные целевые функции повышающие адекватность этих моделей.

Рассмотрим модель на основе уравнения Henderson:

$$u_{TA} = \frac{\sqrt[3]{(-1) \cdot \ln(1 - A_{Hen})}}{(a \cdot T_w)} \quad (6)$$

Рассмотрим модель на основе уравнения Chung и Pfost (ChPf):

$$u_{TA} = (-1) \cdot \frac{\ln \left[(-1) \cdot \frac{R \cdot T_w}{a} \cdot \ln(A_{ChPf}) \right]}{b} \quad (7)$$

Применительно к анализу двухпараметрических моделей выделение компромиссного множества вариантов наиболее полно характеризующих полученный объем данных по адекватности исследуемых моделей. Исходными данными в данном случае являются варианты оценок в рамках моделей, которые хотя бы по одному из оценочных критериев превосходят остальные.

Выделение вариантов из подмножества данных (таблица 3) будем осуществлять на основе аксиомы разумного выбора, которая позволяет выделить определенный достаточно широкий класс многокритериальных задач, в которых успешный выбор обязательно должен осуществляться в пределах множества Парето. Наилучшим сочетанием критериев отвечает модель Hen, использующая целевую функцию ZMPS и модель ChPf, использующая целевую функцию ZCDS. Эти модели представлены ниже.

Таблица 3 - Доминированное по Парето подмножество двухпараметрических моделей

Модель	$\Sigma\sigma_{\Theta}$	$(a_{\Theta})^2$	b_{Θ}	r_{Θ}	$\Sigma\sigma_{\Theta}$
Hen	Z_{MPS}	407	153	0,873	0,934
Hen	Z_{HFE}	412	40	0,861	0,934
Hen	Z_{ARE}	399	73	0,869	0,934
ChPf	Z_{CDS}	671	2132	0,751	0,937
ChPf	Z_{HFE}	470	40	0,831	0,924
ChPf	Z_{SAE}	432	223	0,864	0,93

Как видно из представленных данных (рисунок 3 и рисунок 4) предпочтительней модель Henderson, так как систематическое отклонение модельных данных явно ниже, чем в модели ChPf. Исходя из этого,

можно сделать вывод об ограниченности применения информационного критерия Фишера, так как во втором случае он несколько лучше. С точки зрения набора оценочных критериев компромиссное множество двухпараметрических моделей характеризуется следующим набором границ по наилучшему и наихудшему вариантам.

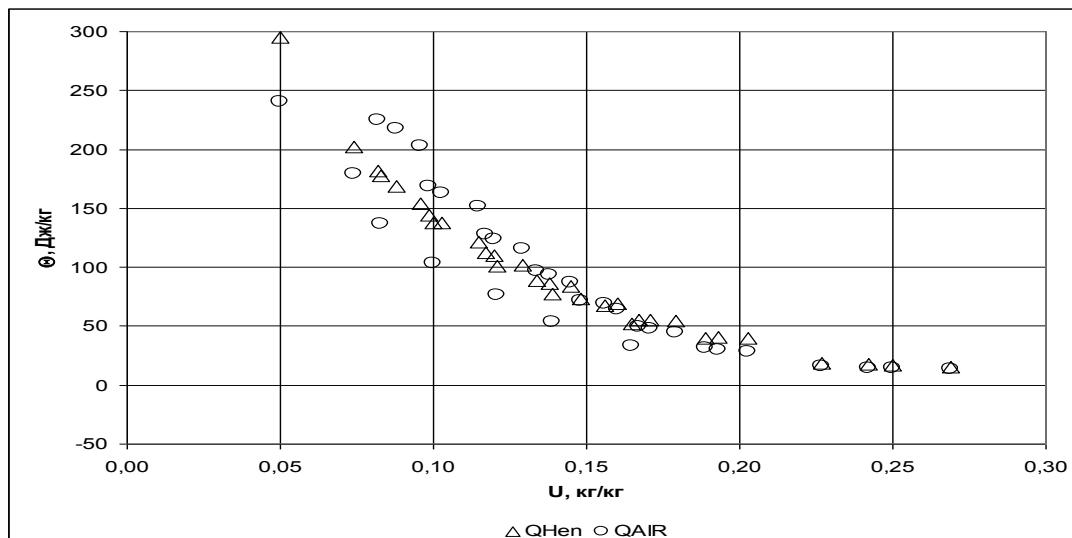


Рис. 3. Модель Henderson критерий Z_{MPS} , $F_{unf} = 207$

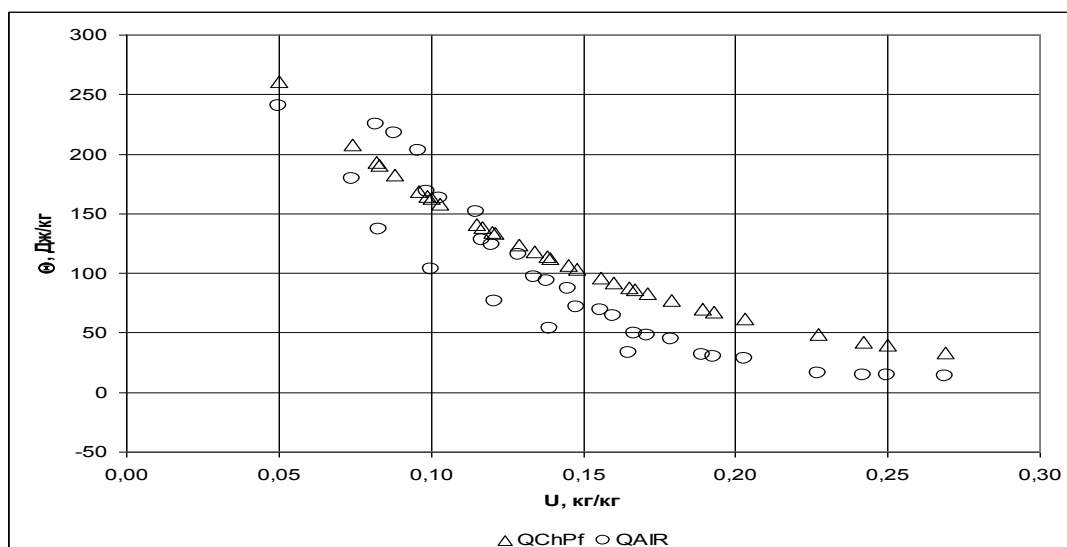


Рис. 4. Модель ChPf критерий Z_{CDS} , $F_{unf} = 217$

Представленные данные (таблица 4) позволяют не только оценить качество множества рассмотренных двухпараметрических моделей, но и сравнить их с трехпараметрическими моделями. Рассмотрим границы компромиссных областей двух и трехпараметрических моделей (таблица 5).

Таблица 4 - Границы оценочных критериев компромиссного по Парето подмножества трехпараметрических моделей

Вариант	$\Sigma\sigma_\Theta$	$(a_0)^2$	b_Θ	r_Θ
Наилучший	407	153	0,873	0,937
Наихудший	671	2132	0,751	0,934

Таблица 5 - Интервалы компромиссных множеств моделей

Два параметра	$\Sigma\sigma_\Theta$	$(a_0)^2$	b_Θ	r_Θ
Наилучший	407	153	0,873	0,937
Наихудший	671	2132	0,751	0,934
Три параметра	$\Sigma\sigma_\Theta$	$(a_0)^2$	b_Θ	r_Θ
Наилучший	258	33	0,952	0,978
Наихудший	358	347	0,925	0,976

Как видно из представленных данных, интервалы компромиссного множества трехпараметрических моделей значительно отличаются в лучшую сторону от аналогичных интервалов компромиссного множества двухпараметрических моделей. Следовательно, трехпараметрическая модель MCE является наиболее информативной в рассмотренном множестве моделей.

ВЫВОД

Интервалы компромиссного множества трехпараметрических моделей значимо отличаются в лучшую сторону от аналогичных интервалов компромиссного множества двухпараметрических моделей, а трехпараметрическая модель МСЕ является наиболее информативной в рассмотренном множестве моделей.

Литература:

1. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
2. Oyelade O.J. Equilibrium Moisture Content Models for Lafun // *International Journal of Food Engineering*. 2008. V. 4(2).
3. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Определение параметров математической модели равновесных свойств зерна в гигроскопической области нелинейной оптимизацией // *Известия вузов. Пищевая технология*. 2010. №5-6. С. 84-86.
4. Статистическая оценка кластерной модели гигроскопичности зерна / С.А. Подгорный [и др.] // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2011. №6. С. 11-14.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.

References:

1. Himmelblau D. *Analysis of the processes by statistical methods*. M.: Mir, 1973.-957 p.
2. Oyelade O.J. *Equilibrium Moisture Content Models for Lafun* // *International Journal of Food Engineering*. 2008. V.4 (2).
3. Podgorny S.A., Kosachev V. S., Koshevoi E.P. *Defining the parameters of the mathematical model of equilibrium properties of grain in the hygroscopic area of non-linear optimization* // *Proceedings of universities. Food Technology*. 2010, № 5-6. P.84-86
4. *Statistical evaluation of the cluster model of water absorption of grain* / Podgorny S.A.[and oth.] // *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2011. № 6 p.11-14.
5. Moiseev N. N. *Mathematical problems of system analysis*. M.: Nauka, 1981. 488 p.