

3. K voprosu opredeleniiia fakticheskoi narabotki dvigatelei vnutrennego sgoraniia / S. V. Malchikov, M. A. Svatkov, I. M. Kolesnikov, I. M. Blainskytein // Intellekt. Innovatsii. Investitsii. – 2018. – No. 2. – S. 84-89.
4. Xing, L., Distefano, S. (2022). Reliability and Performance of Cyber-Physical Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108642. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108642.
5. Liu S, Jiang H. (2023). Engine remaining useful life prediction model based on R-Vine copula with multi-sensor data. *Heliyon*. 9(6): e17118. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17118.
6. Zhou, Z., Long, Z., Wang, R., et al. (2024). An aircraft engine remaining useful life prediction method based on predictive vector angle minimization and feature fusion gate improved transformer model. *Journal of Manufacturing Systems*. 76. 567-584. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.08.025.
7. Liu, J., Yu, Z., Zuo, H., et al. (2022). Multi-stage Residual Life Prediction of Aero-engine Based on Real-time Clustering and Combined Prediction Model. *Reliability Engineering & System Safety*. 225. 108624. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108624.
8. Zhosan, A. A. Obespechenie resursa dvigatelei traktorov agropromyshlennogo kompleksa putem kontrolia uslovii ekspluatatsii po khimmotologicheskemu parametru motornogo masla: monografiia / A. A. Zhosan, S. I. Golovin. – Orel: Orlovskii GAU, 2013. – 189 s.
9. Golovin, S. I. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoianiiia dvigatelei transportnykh sredstv s ispolzovaniem diagnosticheskikh informatorov / S. I. Golovin, M. M. Reviakin, A. A. Zhosan // Sovremennye avtomobilnye materialy i tekhnologii (SAMIT – 2020): sbornik statei XII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 25-letiiu kafedry tekhnologii materialov i transporta, Kursk, 23 oktiabria 2020 goda. – Kursk: Iz-ZGU, 2020. – S. 79-83.
10. Dorofeev, D. I. Resursosberezenie cherez realizatsiiu naznachennogo resursa dvigatelia / D. I. Dorofeev, S. I. Golovin, R. A. Bulavintsev // Professiiia inzhener: Sbornik statei po materialam XI Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orel, 14 aprelia 2023 goda / pod obshchei redaktsiei A.L. Sevostianova. – Orel: Orlovskii GAU, 2023. – S. 381-387.
11. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlja EVM No. 2024665825 Rossiiskaia Federatsiia. Prognozirovanie ostatochnogo resursa dvigatelia vnutrennego sgoraniia: No. 2024664423: zaiavl. 25.06.2024: opubl. 05.07.2024 / A. L. Sevostianov, S. I. Golovin, S. P. Stroev, R. A. Bulavintsev; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Orlovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet im. N.V. Parakhina».



УДК 636.085.68:631.363
DOI: 10.53083/1996-4277-2025-251-9-95-104

П.А. Патрин, Д.С. Рудаков
P.A. Patrin, D.S. Rudakov

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ

RESEARCH FINDINGS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT GRAIN MIXTURES OF DIFFERENT MOISTURE CONTENT

Ключевые слова: комбикорм, многокомпонентный, зерновая смесь, влажное зерно, злаковые культуры, бобовые культуры, физико-механические свойства, скважность зерна, плани-

рование, симплекс – решетчатый план, математические модели, поверхность отклика, объемная масса, угол естественного откоса, коэффициент трения.

При проектировании машин, бункеров и другого оборудования, предназначенного для работы с зерновыми смесями, необходимы знания физико-механических свойств этих смесей, т.к. они влияют на выбор материала (коэффициент трения), размеры и форму бункера (объемная масса, углы естественного откоса и обрушения, склонность к сводообразованию) и т.п. В справочной литературе приведены значения физико-механических свойств только для отдельных зерновых культур при влажности 10-14%. В связи с этим целью работы является получение математических моделей состав – свойства, позволяющих вычислить основные физико-механические свойства многокомпонентных зерновых смесей, в зависимости от их состава и влажности. Для достижения поставленной цели использовали симплекс – решетчатый план Шеффе. В результате проведенных исследований получены уравнения регрессии, описывающие физико-механические свойства зерновой смеси, в произвольном диапазоне варьирования ее состава при влажности 10, 25 и 35%. Установлено, что на основные физико-механические свойства зерновой смеси влияет ее скважность, которая зависит от вида культуры и их содержания в смеси. Так, повышение содержания пшеницы и гороха в смеси понижает ее скважность, а повышение содержания овса и ячменя повышает скважность смеси. Эта зависимость сохраняется с увеличением влажности. Увеличение скважности смеси ведет к снижению значений объемной массы, угла естественного откоса, угла обрушения, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, но увеличивает значения наибольшей ширины сводообразующей щели.

Патрин Петр Александрович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: patrin-50@mail.ru.

Рудаков Денис Сергеевич, зав. лабораторией, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: d.s.rudakov@mail.ru.

Введение

В Западной Сибири основными возделываемыми злаковыми и бобовыми культурами, используемыми на корм животным и птицам, являются ячмень, пшеница, овес, горох. В связи с этим их здоровье и продуктивность напрямую зависят от качества исходного зерна и приготовленного комбикорма.

Keywords: compound feed, multicomponent, grain mixture, wet grain, cereal crops, legume crops, physical and mechanical properties, grain mixture porosity, planning, simplex - lattice design, mathematical models, surface of response, volume weight, natural slope angle, friction coefficient.

When designing machines, hoppers and other equipment intended for working with grain mixtures, the knowledge of the physical and mechanical properties of these mixtures is required, since they affect the choice of material (friction coefficient), the size and shape of the hopper (volume weight, angles of natural slope and collapse, tendency to arch formation), etc. In the reference literature, the values of physical and mechanical properties are given only for individual grain crops at a moisture content level of 10-14%. In this regard, the research goal is to obtain mathematical models of the composition and properties that make it possible to calculate the basic physical and mechanical properties of multicomponent grain mixtures depending on their composition and moisture content. To achieve this goal, Scheffe's Simplex Lattice Model was used. Eventually, regression equations describing the physical and mechanical properties of the grain mixture were obtained in an arbitrary range of varying its composition at moisture content of 10%, 25% and 35%. It was determined that the main physical and mechanical properties of the grain mixture were influenced by its porosity which depended on the crop and crop percentage in the mixture. Thus, larger percentage of wheat and peas in the mixture lowers its porosity, and larger percentage of oats and barley increases the porosity of the mixture. Increasing mixture porosity leads to decreasing values of volume weight, angle of natural slope, angle of collapse, coefficients of internal and external friction, but increases the values of maximum width of arch-forming slot.

Patrin Petr Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: patrin-50@mail.ru.

Rudakov Denis Sergeevich, Head, Laboratory, Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: d.s.rudakov@mail.ru.

В Сибири сбор зерна и его обработка на стационаре часто находятся в сложных погодных условиях, когда кроме предварительной и первичной очистки зерна требуется его сушка. В процессе приготовления зерновой смеси для производства комбикормов в поточной технологической линии предусмотрены операции: очистка, межоперационное хранение, дозирование, смешивание, измельчение и т.д. Надеж-

ность и качество выполнения каждой операции определяются физико-механическими свойствами зерновой смеси, ее сыпучестью, склонностью к сконообразованию и т.д.

Сыпучесть, являющаяся важным показателем физико-механических свойств (ФМС) зерновой массы, определяется двумя параметрами: углом естественного откоса и углом трения зерна о поверхность материала. Следует отметить, что ФМС зерна, даже одной культуры, не являются постоянными величинами. Они подвержены воздействию множества факторов, включая: морфологическую характеристику зерна (форму и структуру поверхности); физические параметры (влажность и степень однородности зерновок); сопутствующие примеси (наличие зерновой или сорной добавки) и агротехнических условий (факторы, связанные с развитием культуры) [1]. Так при увлажнении зерновок их ширина и толщина увеличиваются соответственно, на 10,8 и 6,2% [2]. Зерно, выравненное по размеру, позволяет снизить погрешность дозирования и обеспечить качественное измельчение [3].

Обзор литературных источников [1-14] показал, что ФМС приведены в основном для отдельных культур или отдельно взятых зерновых смесей определённой влажности. В действительности же основу комбикорма составляет злако-бобовая смесь, доля которой не ниже 60-70% [4]. Одним из главных условий экономного и эффективного расходования комбикорма является приготовление злако-бобовой смеси, согласно зоотехническим требованиям и техническим условиям, включающим в себя следующие операции: очистка зерновых компонентов и их межоперационное хранение, дозирование зерновых компонентов согласно рецепту, измельчение зерновой смеси и смещивание. Проектирование и расчет комбикормового оборудования и линии в целом невозможны без учета ФМС зерна и зерновой смеси.

В связи с тем, что рецептурный состав зерновой смеси в условия хозяйства меняется в зависимости от вида животных, их возраста, а

также физиологического состояния, **целью** работы является получение математических моделей состав – свойства, позволяющих вычислить основные ФМС зерновых смесей в любом диапазоне варьирования компонентов и влажности от 10 до 35%.

Объекты и методы

Объектом исследования является процесс изменения основных ФМС зерновой смеси в зависимости от ее фракционного состава и влажности компонентов. В рассматриваемой ситуации применение стандартных методов активного планирования эксперимента оказывается невозможным. Такое обстоятельство объясняется взаимосвязанностью переменных в сложных системах, состоящих из смесей, что обусловлено ограничением: общее содержание всех компонентов в смеси всегда равно единице.

Применение метода наименьших квадратов в этом случае невозможно из-за существующего ограничения. Добавление в матрицу плана столбца, состоящего исключительно из единиц, делает матрицу вырожденной, что делает невозможным её обращение и, следовательно, оценку параметров модели.

Планирование эксперимента проводили на симплекс – решетчатом плане, который описывает математическую модель состав – свойства [10].

Часть результатов представлена в таблице.

Адекватность полученных математических моделей оценивали по критерию Стьюдента. Так как симплекс – решетчатые планы являются насыщенными, проводились дополнительные проверочные опыты, для примера опыт № 15 [11].

При проведении эксперимента № 15 состав зерновой смеси был определен на основе общепринятых пропорций для стандартных комбикормов, составляющих 0,4; 0,2; 0,3; 0,1. При этом использовали общепринятую методику и технические средства для определения ФМС [11-15].

Таблица

Часть плана эксперимента и результаты наблюдений

№ опыта	Влажность, W, %	Состав смеси				Результаты								
		пшеница	ячмень	овес	горох	объемная масса, кг/м ³ (γ)	наибольшая ширина свободообразующей щели, мм(а)	угол естественного откоса, град. (α)	угол обрушения, град. (β)	коэффициент внутреннего трения (трение покоя)				коэффициент внешнего трения (трение скольжения)
										ср.	ср.	мет.	фтор.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	10	1	0	0		746,3	8,3	30	32	0,384	0,384	0,279	0,358	0,372
	25					630,4	13	34	38	0,51	0,51	0,31	0,63	0,466
	35					601,8	15,3	36	35	0,7	0,65	0,331	0,62	0,589
5	10	0,5	0,5	0		781,3	8,3	29	32	0,344	0,344	0,214	0,317	0,326
	25					634,5	13	36	44	0,78	0,554	0,331	0,697	0,489
	35					618,2	13	37	42	0,7	0,51	0,39	0,587	0,46
11	10	0,33	0,33	0,33	0	657,9	14,7	28	31	0,344	0,364	0,143	0,324	0,335
	25					545,5	13	36	42	0,577	0,532	0,231	0,515	0,447
	35					546,9	25	43	44	0,68	0,532	0,31	0,587	0,477
15	10	0,4	0,2	0,3	0,1	577,2	12,3	29	31	0,364	0,384	0,23	0,328	0,342
	25					534,5	16	34	40	0,51	0,51	0,292	0,406	0,351
	35					537,3	22	40	44	0,625	0,601	0,546	0,554	0,522

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие ФМС зерновой смеси, в произвольном диапазоне варьирования ее состава при влажности 10, 25 и 35%. [11]:

уравнения регрессии для объемной массы зерновой смеси:

$$W=10\%$$

$$\eta = 746,322x_1 + 684,845x_2 + 526,3x_3 + 781,256x_4 + 262,691x_1x_2 - 192,367x_1x_3 + 21,669x_1x_4 - 248,454x_2x_3 + 52,8378x_2x_4 - 367,739x_3x_4 + 680,595x_1x_2x_3 - 773,3003x_1x_2x_4 + 892,356x_1x_3x_4 + 2249,423x_2x_3x_4 - 32162,926x_1x_2x_3x_4;$$

$$W=25\%$$

$$\eta = 630,4x_1 + 610,5x_2 + 464,2x_3 + 721,5x_4 + 56,6x_1x_2 - 281,6x_1x_3 + 97x_1x_4 - 118,6x_2x_3 - 183,6x_2x_4 - 117x_3x_4 - 413,4x_1x_2x_3 - 1366,2x_1x_2x_4 - 711,6x_1x_3x_4 + 1070,4x_2x_3x_4 - 7339,2x_1x_2x_3x_4;$$

$$W=35\%$$

$$\eta = 601,8x_1 + 566,7x_2 + 453,8x_3 + 653,5x_4 + 135,8x_1x_2 + 3,2x_1x_3 - 29,4x_1x_4 - 67,8x_2x_3 - 39,6x_2x_4 - 100,2x_3x_4 - 48x_1x_2x_3 + 160,5x_1x_2x_4 + 932,7x_1x_3x_4 + 1049,4x_2x_3x_4 - 14912,8x_1x_2x_3x_4;$$

уравнения регрессии для угла естественного откоса:

$$W=10\%$$

$$\eta = 29,667x_1 + 31,333x_2 + 26x_3 + 28,667x_4 - 6x_1x_2 - 6x_1x_3 - 3,333x_1x_4 - 2,667x_2x_3 - 8x_2x_4 + 2,667x_3x_4 + 17x_1x_2x_3 + 37x_1x_2x_4 - 10x_1x_3x_4 - 3x_2x_3x_4 + 145,333x_1x_2x_3x_4;$$

$$W=25\%$$

$$\eta = 33,667x_1 + 33,333x_2 + 31,667x_3 + 28,667x_4 + 10x_1x_2 + 25,333x_1x_3 + 24,667x_1x_4 + 36,667x_2x_3 + 14,667x_2x_4 + 16,667x_3x_4 - 141x_1x_2x_3 - 10x_1x_2x_4 - 245x_1x_3x_4 - 246x_2x_3x_4 + 989,333x_1x_2x_3x_4;$$

$$W=35\%$$

$$\eta = 36,333x_1 + 36x_2 + 41,333x_3 + 33x_4 - 23,333x_1x_2 + 15,333x_1x_3 + 1,333x_1x_4 + 6,667x_2x_3 + 11,333x_2x_4 + 0,667x_3x_4 + 133x_1x_2x_3 + 146x_1x_2x_4 - 103x_1x_3x_4 - 158x_2x_3x_4 + 504x_1x_2x_3x_4.$$

Полученные уравнения регрессии были проанализированы с помощью программного обеспечение «Statistica 10», которая обеспечила визуализацию полученных зависимостей в виде графических проекций и поверхностей отклика (рис. 1).

На поверхности откликов, отображающих взаимосвязь между объемной массой зерновой смеси и количественным содержанием компонентов смеси (рис. 1 а, б, в), видно, что при значении содержания гороха 0,4 в смеси наибольшее влияние на объемную массу оказывает величина содержания пшеницы и овса, влияние ячменя минимальное. Увеличение содержания пшеницы в смеси увеличивает значение объемной массы до 770 кг/м³, это объясняется тем, что пшеница имеет наименьшую скважистость – 35-45% [15], зачет размера, формы и гладкой поверхности. Пшеница наиболее полно заполняет пространство между зерновками других культур, тем самым увеличивая вес зерновой массы при постоянном объеме. Увеличение содержания овса ведет к снижению значения объ-

емной массы до 560 кг/м³, поскольку у овса набольшая скважистость – 50-70% [15], за счет продолговатой формы и наличия плотной оболочки, которая увеличивает объем зерновки, тем самым увеличивая общий объем зерновой массы. Увеличение содержания ячменя снижает значения объемной массы с 770 до 745 кг/м³, так как скважистость равна 45-55%, при близком размере с пшеницей ячмень имеет вытянутую форму и шероховатую оболочку, это ведет к неравномерному заполнению объема зерновой массой. Эти зависимости сохраняются при изменении влажности с 10 до 35%.

При значении содержания пшеницы в смеси, равном 0,4 (рис. 1 г, д, е), наибольшее влияние оказывает величина содержания овса и гороха, увеличение содержания овса снижает значения объемной массы, как и на рисунке 1 а, б, в, а увеличение содержания гороха в смеси увеличивает значения объемной массы, поскольку скважистость 40-45% [15]. Увеличение содержания ячменя минимально снижает значения объемной массы как и на рисунке 1 а, б, в.

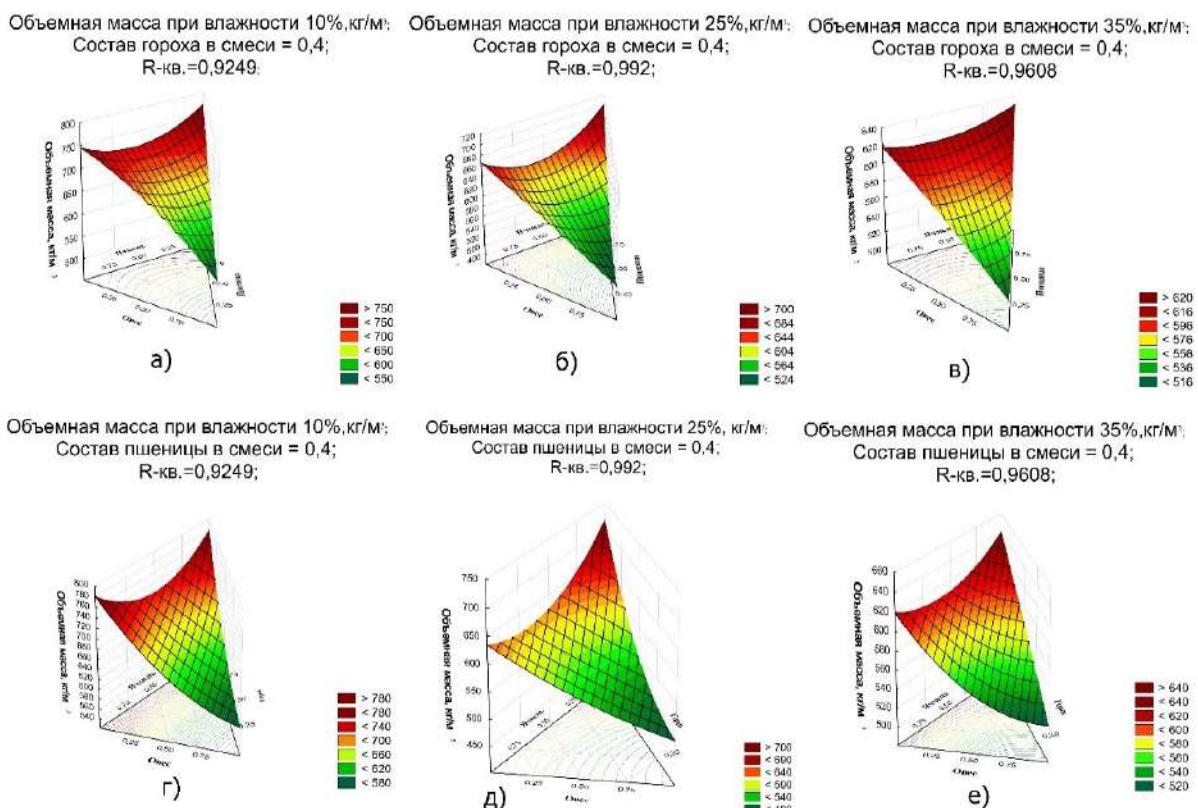


Рис. 1. Поверхности отклика объемной массы зерновой смеси при влажности 10, 25 и 35%

Полученные зависимости сохраняются при содержании 0,4 как для ячменя, так и для овса, и даже при увеличении влажности смесей с 10 до 35%.

Из рисунка 2 а видно, что при значении содержания гороха 0,4 в смеси, наибольшее значение угла естественного откоса равно $29,05^{\circ}$, это происходит при среднем содержании ячме-

ня, максимальном содержании пшеницы и минимальном содержании овса. Уменьшается общая скважность смеси, зерновки более плотно располагаются друг к другу, увеличивая внутренний коэффициент трения зерновой смеси, тем самым увеличивая угол естественного откоса.

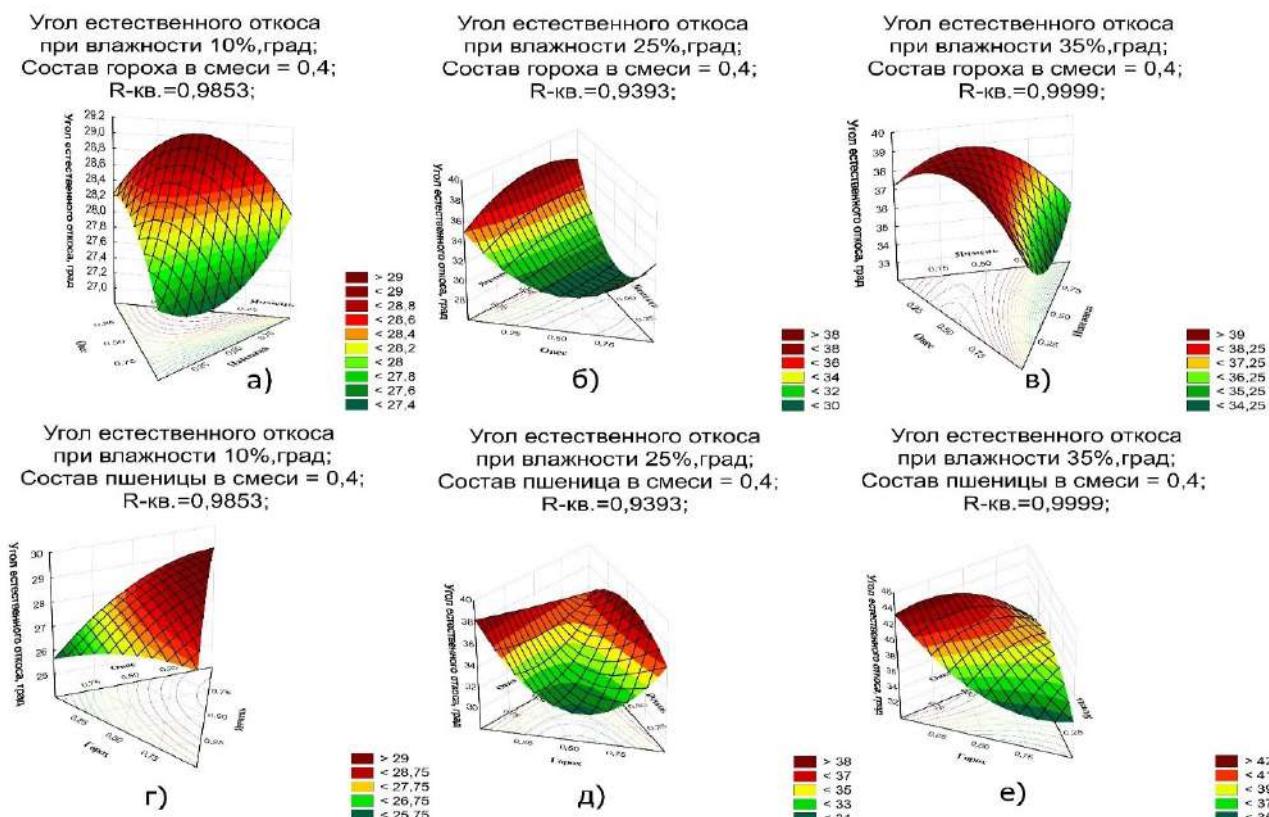


Рис. 2. Поверхности отклика угла естественного откоса зерновой смеси при влажности 10, 25 и 35%

Минимальное значение угла естественного откоса ($27,40^{\circ}$) достигается при содержании пшеницы в диапазоне от 0,25 до 0,5, минимальном содержании ячменя и максимальном овса (рис. 2 а). Это обусловлено увеличением скважности смеси. Зависимости сохраняются для пшеницы и ячменя при повышении влажности смеси до 35%. В то же время при влажности 25% и средних значениях содержания пшеницы и овса (рис. 2 б) угол естественного откоса снижается. Это связано с тем, что увеличение объема зерновок овса превосходит в большей степени, чем увеличение их массы, что в свою очередь приводит к росту скважности. При повыше-

нии влажности овса до 35% (рис. 2 в) наблюдается увеличение массы зерновок при незначительном росте объема. Это способствует росту внутреннего коэффициента трения смеси и, следовательно, увеличению угла естественного откоса. На рисунках 2 г, д, е также сохраняются зависимости, описанные выше.

Таким образом, увеличение скважности зерновой смеси ведет к снижению значений угла естественного откоса за счет уменьшения внутреннего коэффициента трения смеси. Это подтверждают построенные поверхности откликов для коэффициентов внутреннего и внешнего трения (рис. 3).

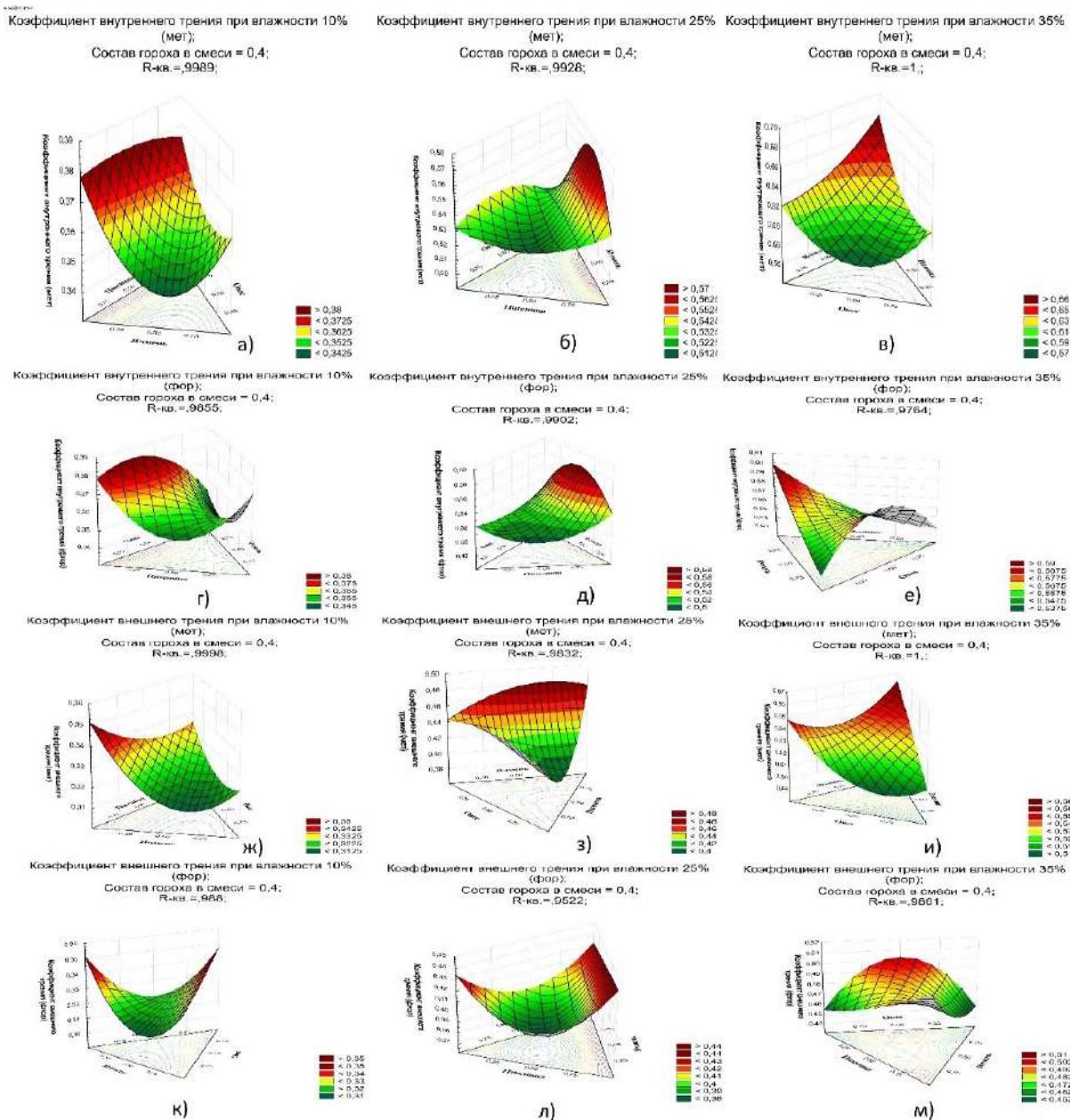


Рис. 3. Поверхности отклика коэффициентов внутреннего и внешнего трения зерновой смеси при влажности 10, 25 и 35%

По данным рисунка 3 видно, что с увеличением влажности смеси зависимость становится более выраженной.

Увеличение значений наибольшей ширины сводообразующей щели обуславливается увеличением скважности зерновой смеси (рис. 4), в основном за счет увеличения содержания овса, который имеет продолговатую форму, что затрудняет истечение смеси.

Выводы

1. Полученные математические модели обеспечивают возможность прогнозирования основных физико-механических свойств зерновой смеси, состоящей из пшеницы, ячменя, овса и гороха, при уровнях влажности 10, 25 и 35%. Прогнозирование возможно в любом диапазоне пропорций компонентов зерновой смеси.
2. В результате проведенных исследований установлено, что на основные ФМС зерно-

вой смеси влияет ее скважность, которая зависит от вида культуры и их содержания в смеси.

3. Повышение содержания пшеницы и гороха в смеси понижает ее скважность, а повышение содержания овса и ячменя повышает скважность смеси. Эта зависимость сохраняется с увеличением влажности.

4. Увеличение скважности смеси ведет к снижению значений объемной массы, угла естественного откоса, угла обрушения, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, но увеличивает значения наибольшей ширины сводообразующей щели.

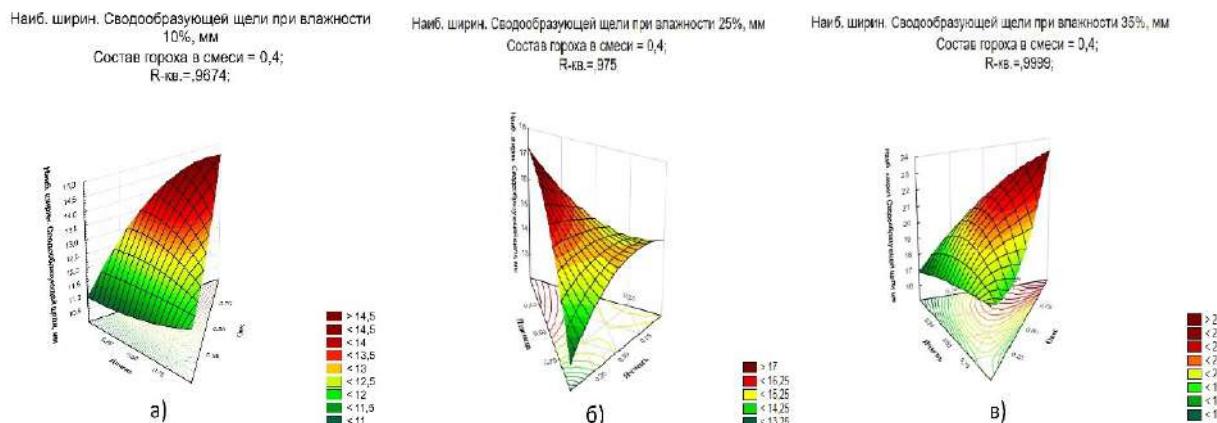


Рис. 4 – Поверхности отклика наибольшей ширины сводообразующей щели зерновой смеси при влажности 10, 25 и 35%

Библиографический список

- Ульрих Н. Н. Изменение влажности хлебов на корню в течение суток и уборка комбайном / Н. Н. Ульрих. – Текст: непосредственный // Машино-тракторная станция. – 1956. – № 3. – С. 25-28.
- Соседов, Н. И. Влажность отдельных зерен пшеницы в период ее уборки / Н. И. Соседов, В. А. Швецова, З. Б. Дроздова. – Текст: непосредственный // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки. – 1954. – № 27. – С. 5-29. – EDN ХВААН.
- Семенов, А. Н. Физико-механические свойства зерна / А. Н. Семенов. – Текст: непосредственный // Труды Кишиневского сельскохозяйственного института имени М. В. Фрунзе. – 1959. – Т. 20. – С. 311-346.
- Иванов, Ю. А. Инновационные направления развития механизации и автоматизации животноводства / Ю. А. Иванов. – Текст: непосредственный // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – Т. 22, № 1 (1). – С. 7-28. – EDN ОИХНН.
- El-Sheikha, M. A., Morsy H., Al-Rajhi M. (2010). Some physical and mechanical properties of wheat grain. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 1 (3): 299–309.
- Физико-механические свойства зерна / Н. А. Сергеев, Н. О. Цимбал, С. А. Муканов, А. Г. Кулаева. – Текст: непосредственный // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: сборник материалов IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 28 февраля 2023 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2023. – С. 347-351. – EDN ОМ҆QGQY.
- Масиенко, И. В. Физико-механические свойства зерна сельхозкультур / И. В. Масиенко, С. А. Кочкудан. – Текст: непосредственный // Проблемы научной мысли. – 2025. – Т. 1, № 2. – С. 99-101. – EDN BONOVL.
- Verruijt, A. (2001). *Soil Mechanics*. Delft: Delft University of Technology.
- Аскарова, А. А. Использование физико-механических свойств зерна в практических целях / А. А. Аскарова, А. С. Турар. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 9 (251), 2025.

средственный // Современные проблемы науки и образования: сборник материалов X Международной студенческой научной конференции, Москва, 01 декабря 2017 года – 21 2018 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Евроазиатская научно-промышленная палата», 2018. – Т. 6. – С. 101. – EDN EUQYEA.

10. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова [и др.]. – Москва: Металлургия, 1982. – 752 с. – EDN МЕМОРЕ.

11. Кондратов, А. Ф. Исследование физико-механических свойств многокомпонентных зерновых смесей с использованием симплекс-решетчатого планирования эксперимента / А. Ф. Кондратов, П. А. Патрин, Д. С. Рудаков. – Текст: непосредственный // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2012. – № 3 (24). – С. 97-102. – EDN PJTNHV.

12. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. – Москва: Колос, 1970. – 423 с. – Текст: непосредственный.

13. Слободская, А. А. Исследование некоторых физико-механических свойств зерна / А. А. Слободская. – Текст: непосредственный // Развитие отраслей АПК на основе формирования эффективного механизма хозяйствования: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Киров, 18 декабря 2019 года / ФГБОУ ВО Вятская государственная сельскохозяйственная академия. – Киров: Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – Т. 1. – С. 204-208. – EDN SCIQL.

14. Лукянов, П. И. Аппараты с движущимся зернистым слоем. Теория и расчет. – Москва: Машиностроение, 1974. – 184 с. – Текст: непосредственный.

15. Стародупцева, А. И. Практикум по хранению зерна / А. И. Стародупцева, Н. И. Паньшина. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Москва: Колос, 1976. – 256 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Ulrikh N. N. Izmenenie vlastnosti khlebov na korniu v techenie sutok i uborka kombainom // Mashinno-traktornaia stantsiya. – 1956. – No. 3. – S. 25-28.
2. Sosedov, N. I. Vlastnost' otdelnykh zeren pshenitsy v period ee uborki / N. I. Sosedov, V. A. Shvetsova, Z. B. Drozdova // Trudy VNIIZ. – 1954. – No. 27. – S. 5-29.
3. Semenov A.N. Fiziko-mekhanicheskie svoistva zerna // Trudy Kishinevskogo SKhI. – 1959. – T. 20. – S. 311-346.
4. Ivanov, Iu. A. Innovatsionnye napravleniya razvitiia mekhanizatsii i avtomatizatsii zhivotnovodstva / Iu. A. Ivanov // Nauchnye trudy GNU VNIIMZh Rosselkhozakademii. – 2011. – T. 22, No. 1 (1). – S. 7-28.
5. El-Sheikha, M. A., Morsy H., Al-Rajhi M. (2010). Some physical and mechanical properties of wheat grain. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 1 (3): 299–309.
6. Fiziko-mekhanicheskie svoistva zerna / N. A. Sergeev, N. O. Tsimbal, S. A. Mukanov, A. G. Kulaeva // Rol nauchno-issledovatel'skoi raboty obuchaiushchikhsya v razvitiu APK: Sbornik IV Vse-rossiiskoi (natsionalnoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, Omsk, 28 fevralia 2023 goda. – Omsk: Omskii GAU, 2023. – S. 347-351.
7. Masienko, I. V. Fiziko-mekhanicheskie svoistva zerna selkhozkultur / I. V. Masienko, S. A. Kochkudan // Problemy nauchnoi mysli. – 2025. – T. 1, No. 2. – S. 99-101.
8. Verruijt, A. (2001). *Soil Mechanics*. Delft: Delft University of Technology.
9. Askarova, A. A. Ispolzovanie fiziko-mekhanicheskikh svoistv zerna v prakticheskikh tseliakh / A. A. Askarova, A. S. Turar // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia: materialy X Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii, Moskva, 01 dekabria 2017 goda. T. 6. – Saratov: OOO "Evroaziatskaia nauchno-promyshlennaia palata", 2018. – S. 101.
10. Tablitsy planov eksperimenta dlia faktornykh i polinomialnykh modelei / V. Z. Brodskii,

- L. I. Brodskii, T. I. Golikova [i dr.]. – Moskva: Metalurgiia, 1982. – 752 s.
11. Kondratov, A. F. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoistv mnogokomponentnykh zernovykh smesei s ispolzovaniem simpleks-reshetchatogo planirovaniia eksperimenta / A. F. Kondratov, P. A. Patrin, D. S. Rudakov // Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet). – 2012. – No. 3 (24). – S. 97-102.
12. Fiziko-mekhanicheskie svoistva rastenii, pochv i udobrenii. – Moskva: Kolos, 1970. – 423 s.
13. Slobodskova, A. A. Issledovanie nekotorykh fiziko-mekhanicheskikh svoistv zerna / A. A. Slobodskova // Razvitiye otraslei APK na osnove formirovaniia effektivnogo mekhanizma khoziaistvovaniia: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kirov, 18 dekabria 2019 goda / FGBOU VO Viatskaia gosudarstvennaia selskokhoziaistvennaia akademiiia. Ch. 1. – Kirov: Viatskaia GSKhA, 2019. – S. 204-208.
14. Lukianov P. I. Apparaty s dvizhushchimisya zernistym sloem. Teoriia i raschet. – Moskva, Mashinostroenie, 1974. – 184 s.
15. Staroduptseva A. I. Praktikum po khraneniiu zerna / A. I. Staroduptseva, N. I. Panshina. Izd. 2 – e, dop. i pererab. – Moskva, Kolos, 1976. – 256 s.

