

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В РАЗМОЛАХ КУКУРУЗЫ И ПШЕНИЦЫ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ КОРМОВ

М.В. Беляков, Е.А. Никитин, Ф.Е. Владимиров

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

E-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru

Для цитирования: Беляков М.В., Никитин Е.А., Владимиров Ф.Е. Разработка методики люминесцентного контроля содержания влаги в размолах кукурузы и пшеницы при приготовлении кормов // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 3 (76). – С. 48–58. – DOI: 10.31677/2072-6724-2025-76-3-48-58.

Ключевые слова: приготовление кормов, контроль качества, влажность, зерновые корма, спектр возбуждения, спектр люминесценции, поток фотолюминесценции.

Реферат. Приведены результаты исследования оптических свойств размолот зерна кукурузы и зерна пшеницы при различном содержании влаги в исследуемых образцах. Предложена методика варьирования содержания влаги в размолах зерна при оптических измерениях для определения корреляционно-спектральных зависимостей. При проведении оптических спектральных измерений использовали дифракционный спектрофлуориметр CM2203 (ЗАО «Солар», Белоруссия). Измерения спектральных характеристик возбуждения $\eta(\lambda)$ при расширенном сканировании в синхронном режиме проводили в диапазоне 230–600 нм, при средней чувствительности фотозлектронного умножителя, длительности импульса $\tau_{\text{от}} = 20$ мкс, задержке импульса $\tau_{\text{з}} = 0,75$ мкс. Измерены синхронные спектры возбуждения размолот зерна кукурузы при варьировании содержания влаги, спектры фотолюминесценции размолот кукурузы для $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм при варьировании содержания влаги, спектры фотолюминесценции размолот пшеницы при варьировании содержания влаги для $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм. Определены зависимости потока фотолюминесценции при варьировании содержания влаги зерновых размолот и их линейные аппроксимации для кукурузы ($\lambda_{\text{в}} = 362$ нм), для пшеницы ($\lambda_{\text{в}} = 362$ нм и $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм). Статистически достоверные зависимости от влажности можно получить для интегральных потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 362 нм для размолот кукурузы, 362 и 424 нм – для размолот пшеницы.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR LUMINESCENT CONTROL OF MOISTURE CONTENT IN CORN AND WHEAT GRINDINGS IN FEED PREPARATION

M.V. Belyakov, E.A. Nikitin, F.E. Vladimirov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

E-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru

Keywords: feed preparation, quality control, humidity, grain feed, excitation spectrum, luminescence spectrum, photoluminescence flux.

Abstract. The results of the study of the optical properties of corn and wheat grain grinds at different moisture content are presented in the studied samples. A technique for varying the moisture content in grain grinds with optical measurements to determine correlation and spectral dependencies is proposed. A diffraction spectrofluorimeter CM2203 (Solar CJSC, Belarus) was used for optical spectral measurements. Measurements of the spectral characteristics of excitation $n(\lambda)$ with extended scanning in synchronous mode were carried out in the range from 230–600 nm, with an average sensitivity of a photoelectron multiplier, pulse duration $\tau_{\text{off}} = 20$ microseconds, pulse delay $t = 0.75$ microseconds. Synchronous excitation spectra of corn grain grinding with varying moisture content, photoluminescence spectra of corn grinding for $\lambda = 362$ nm with varying moisture content, photoluminescence spectra of wheat grinding with varying moisture content for $\lambda = 362$ nm were measured. The dependences of the photoluminescence flux with varying moisture content of grain grinds and their linear approximations for corn ($\lambda = 362$ nm), for wheat ($\lambda = 362$ nm) and ($\lambda = 424$ nm) are determined. Statistically reliable dependences on humidity can be obtained for integral photoluminescence fluxes when excited by 362 nm radiation for corn grinds and 362 nm and 424 nm for wheat grinds.

Устоявшийся инновационный тренд последнего десятилетия в аграрном и производственном секторе – это разработка оптических средств бесконтактного контроля качества производимой продукции на предмет соответствия предъявляемым требованиям [1, 2].

В большинстве своем для реализации подобных программно-аппаратных комплексов используются фоточувствительные датчики, которые воспринимают отраженный оптический сигнал и измеряют фотонапряжение при диагностике биологических объектов, причем для параметров различного типа используются фотодиоды различных длин волн и чувствительности [3].

Говоря о влажности зерновых культур, этот параметр необходимо учитывать при принятии решений по срокам выполнения агротехнических операций, связанных с внесением удобрений, моментом уборки. Кроме того, следует определять необходимость проведения дополнительных послеуборочных мероприятий, связанных с доведением зерновых культур до оптимальных параметров влажности, обеспечивающих безопасное длительное хранение [4, 5].

Как известно, влажность зерновых культур можно измерять гравиметрическим, диэлькометрическим и оптическим методами.

Гравиметрический метод предполагает отбор проб анализируемого зерна, взвешивание и фиксацию первого показателя массы взятой пробы. Далее зерно подвергается сушке путем помещения в дегидратор, или сушильную камеру, где до прекращения убывания массы пробы зерна производится термическая обработка. Методом пропорции высчитывается процент потерянной влаги и делается заключение об уровне влажности исследуемого корма. К существенным недостаткам гравиметрического метода относят его пожароопасность, а также затраты времени, связанные с пробоподготовкой и проведением анализа, в совокупности составляющие до 30 мин [6].

Диэлькометрический метод основан на корреляционной зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нем влаги. Этот метод получил самое широкое распространение. Результаты оценки влажности можно получить за 20 с. Однако существенным недостатком метода является погрешность измерений до 5 % [7].

Оптические методы – это наиболее перспективные методы, имеющие широкий потенциал развития. Приборы, работающие на основе оптики, являются достаточно дорогостоящими с

точки зрения их разработки, однако потенциал аппаратной части раскрывает существенно более широкие возможности в части количества определяемых показателей [8–10].

Каждый химический элемент, который содержится в зерновом материале, обладает уникальными оптическими свойствами. Оценка характеристик поглощения или отражения света на определенных длинах волн позволяет определять концентрацию соответствующих химических элементов [11, 12].

В рамках настоящего исследования была разработана методика люминесцентного контроля содержания влаги в размолах пшеницы и кукурузы. Выбор культур обосновывается тем, что пшеница и кукуруза относятся к самым широкораспространенным зерновым культурам в Российской Федерации. Доля выращивания пшеницы составляет около 77 %, эта культура востребована в бытовой и хозяйственной деятельности человека, на втором месте, по данным различных источников, находится кукуруза, доля выращивания этой культуры существенно возросла за последние 10 лет, объемы ее производства незначительно опережают ячмень и составляют около 8 %, что связывают с активным развитием животноводства и использованием зерна кукурузы в качестве основного компонента концентрированного комбикорма, особенно для крупного рогатого скота [13, 14].

Несмотря на схожий химический состав зерна кукурузы и пшеницы, эти культуры оказывают разное влияние на организм животного. Крахмал пшеницы быстро ферментируется бактериями и расщепляется на 90 % в рубце крупного рогатого скота. Данный процесс происходит в более короткий срок с крахмалом кукурузы, расщепление которого происходит на 30 % меньше. Это оказывает существенное влияние на кислотно-щелочной баланс рубца и повышает риск ацидоза у животного, тем самым занижая показатель перевариваемости клетчатки. Животноводческие предприятия из северных регионов Российской Федерации не имеют возможности самостоятельно выращивать кукурузу с последующей уборкой на зерно, а покупка подобной культуры часто влияет на себестоимость получаемой продукции в сторону увеличения. Поэтому ряд предприятий вынуждены использовать пшеницу в качестве дешевой альтернативы в качестве источника крахмала в концентрированных кормах, частично заменяя кукурузу, в том числе путем предварительного

расчета рациона с использованием специализированного программного обеспечения [15–17].

Неотъемлемым мероприятием расчета рациона является определение доли потребляемого сухого вещества животным. При этом мероприятие по определению содержания влаги (обратная величина содержания сухого вещества) в каждом компоненте кормовой смеси, в том числе в концентрированном, становится обязательной составляющей эффективного кормления.

Цель исследований – разработать методику контроля содержания влаги на основе изменения фотолюминесцентных свойств концентрированных кормов на примере кукурузы и пшеницы.

Задачи исследования:

1) Провести пробоподготовку размолов зерна кукурузы и зерна пшеницы с варьируемыми показателями содержания влаги для последующих оптических измерений.

2) Измерить спектры фотолюминесценции размолов кукурузы и пшеницы с варьируемыми показателями содержания влаги.

3) Определить зависимости между содержанием влаги и оптическими свойствами размолов зерна кукурузы и пшеницы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования использовалось зерно кукурузы и зерно пшеницы урожая 2023 г. в виде размолов. Каждая проба зерна, предназначенная для проведения оптических измерений, подвергалась размолу на лабораторном измельчителе на 30 с для каждой пробы.

Варьирование содержания влаги в образцах зерновых размолах кукурузы и пшеницы осуществлялось в предварительно определенных диапазонах, от 8,9 до 23,7 %. Границы диапазонов варьирования установлены исходя из технических условий ГОСТ 9353–2016. Пшеница и ГОСТ Р 53903–2010. Кукуруза кормовая.

Обобщающее описание процесса варьирования содержания влаги для проведения оптических измерений осуществлялось согласно принципиальной схеме, представленной на рис. 1.

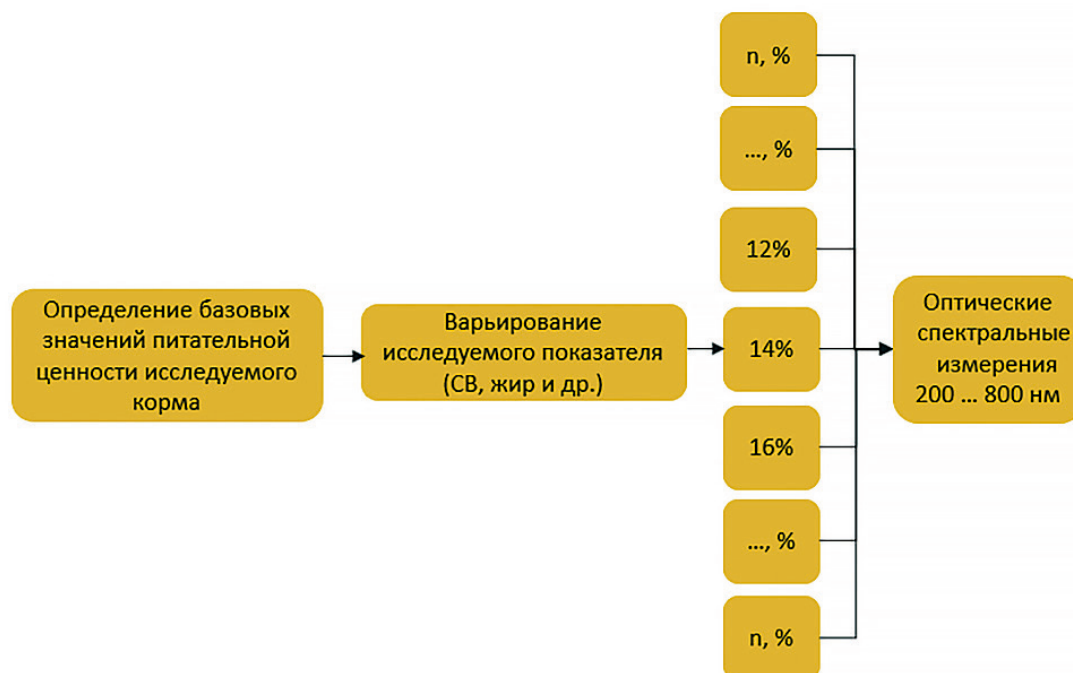


Рис. 1. Описание методики варьирования содержания влаги
Description of the method for varying moisture content

Процесс варьирования содержания влаги в меньшую сторону от базового показателя осуществлялся гравиметрическим методом, путем размещения зернового размола во влагомере с

аналитическими весами, после чего были получены образцы кукурузы с содержанием влаги 8,9; 4,9; 6,9; 9,9 %. Базовое значение содержания влаги в размоле зерна кукурузы составило 12,4 %,

образцы зернового размола с увеличенным содержанием влаги были получены путем введения дистиллированной воды в зерновой размол с контролем внесения на аналитических весах и последующего 8-часового хранения в герметичном бьюксе. Показатели образцов зернового размола кукурузы с увеличенным значением содержания влаги составили 15,4; 16,8; 20,4; 23,7 %.

Пробоподготовка образцов зернового размола пшеницы производилась по аналогичной методике, при этом базовое значение содержания влаги составило 13,8 %. Значение образцов зернового размола после сушки составило 3,3; 5,3; 7,3; 8,3; 10,0; 12,2 %. Показатели образцов зернового размола пшеницы с увеличенным значением содержания влаги составили 14,3; 13,0; 16,6 %.

Для оптических спектральных измерений использовали дифракционный спектрофлуориметр СМ2203 (ЗАО «Солар», Республика Беларусь). Измерения спектральных характеристик возбуждения $\eta(\lambda)$ при расширенном сканировании в синхронном режиме проводили в диапазоне

230–600 нм, при средней чувствительности фотоэлектронного умножителя, длительности импульса $\tau_{\text{дл}} = 20$ мкс, задержке импульса $\tau_{\text{зд}} = 0,75$ мкс. Методика измерений и обработки результатов более подробно описана в [18]. На основе полученных спектров $\eta(\lambda)$ для основных длин волн возбуждающего излучения $\lambda_{\text{в}}$ измерены спектры фотолюминесценции $\phi(\lambda)$. Для спектров рассчитаны интегральные параметры возбуждения H и фотолюминесценции Φ (поток), а также статистические параметры: математическое ожидание M_{λ} , дисперсия σ^2 , асимметрия As и эксцесс Ex . Расчеты проводили по общепринятым формулам аналогично [19] с использованием программных пакетов MS Excel и Microcal Origin.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры возбуждения размолотов кукурузы различной влажности представлены на рис. 2.

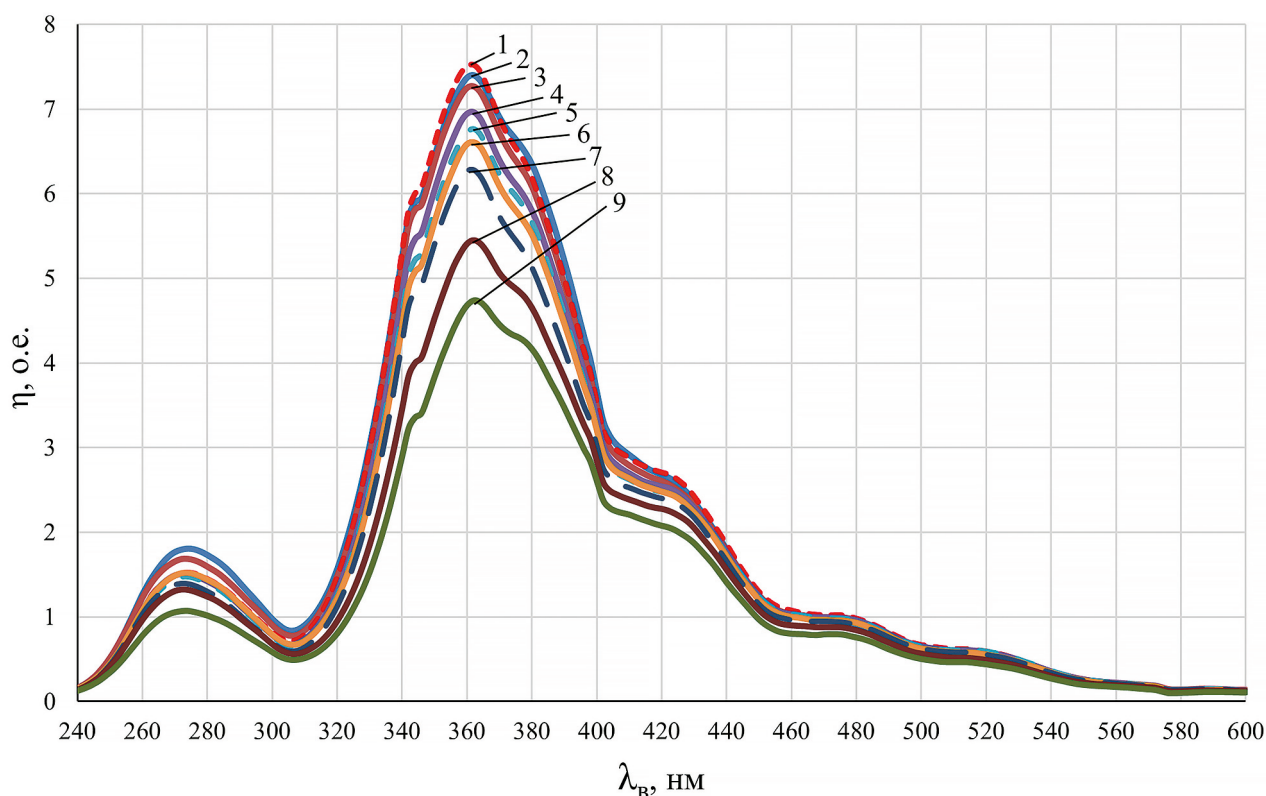


Рис. 2. Синхронные спектры возбуждения размола кукурузы при увлажнении: 1 – 8,9 %; 2 – 4,9 %; 3 – 6,9 %; 4 – 9,9 %; 5 – 12,4 %; 6 – 15,4 %; 7 – 16,8 %; 8 – 20,4 %; 9 – 23,7 %

Synchronous excitation spectra of corn grinding during moistening

Сравнивая характеристики с полученными ранее для целых семян [20], следует отметить, что для молотого зерна преобладает выраженный

максимум на $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм и более коротковолновый на 272 нм, в то время как характерный для целого зерна максимум 424 нм замечен гораздо слабее.

Кроме того, закономерно при увеличении влажности характеристики $\eta(\lambda)$ смещаются вниз, не меняясь качественно. Это объясняется тушением люминесценции за счёт изменения концентрации механически связанной (свободной) влаги в приповерхностных тканях.

Количественные изменения зависимостей, представленных на рис. 2 графиков, характеризует интегральный параметр H . Результаты его расчета как во всем спектральном диапазоне, так и в отдельных диапазонах, соответствующих его максимумам, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интегральные параметры спектров возбуждения размола кукурузы при изменении влажности
Integral parameters of excitation spectra of corn grinding with changing humidity

Влажность W , %	$H \pm \Delta H$, о. е. (в спектральных диапазонах)			
	250–305 нм	305–405 нм	405–455 нм	230–600 нм
4,9	$75,2 \pm 5,8$	470 ± 23	114 ± 8	725 ± 38
6,9	$70,5 \pm 8,3$	455 ± 27	112 ± 7	708 ± 46
8,9	$63,5 \pm 9,1$	466 ± 10	116 ± 6	717 ± 17
9,9	$62,3 \pm 7,6$	430 ± 16	109 ± 5	671 ± 26
12,4	$60,9 \pm 8,9$	415 ± 28	107 ± 9	654 ± 47
15,4	$62,6 \pm 5,4$	406 ± 12	106 ± 5	643 ± 22
16,8	$57,3 \pm 5,8$	382 ± 20	103 ± 7	609 ± 35
20,4	$54,7 \pm 5,1$	334 ± 18	97 ± 7	547 ± 28
23,7	$45,2 \pm 4,4$	292 ± 13	89 ± 4	481 ± 21

Погрешность измерения интегральных параметров возбуждения составляет не более 7 %.

Были измерены характеристики фотолюминесценции $\phi(\lambda)$ для трех длин волн возбуждения:

$\lambda_b = 272$ нм, $\lambda_b = 362$ нм, $\lambda_b = 424$ нм. Пример характеристик для возбуждения излучением длины волны 362 нм представлен на рис. 3.

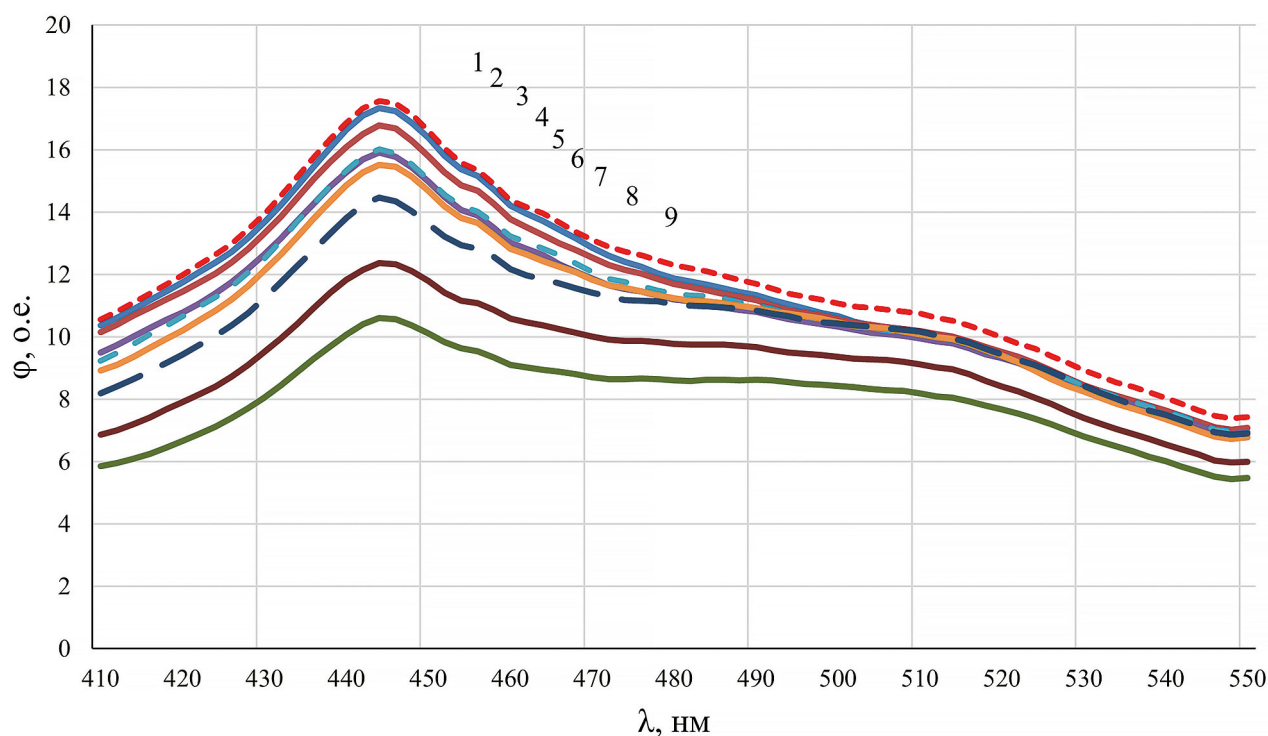


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции размола кукурузы для $\lambda_b = 362$ нм при увлажнении: 1 – 8,9 %; 2 – 4,9 %; 3 – 6,9 %; 4 – 12,4 %; 5 – 9,9 %; 6 – 15,4 %; 7 – 16,8 %; 8 – 20,4 %; 9 – 23,7 %
Photoluminescence spectra of corn grinding for $\lambda_b = 362$ nm under humidification

Ожидаемо, что спектры фотолюминесценции при изменении влажности ведут себя аналогично

спектрам возбуждения. Интегральные потоки фотолюминесценции представлены в табл. 2.

Таблица 2

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции размола кукурузы при изменении влажности
Integral parameters of photoluminescence spectra of corn grinding with changing humidity

Влажность W , %	$\Phi \pm \Delta\Phi$, о. е. (для различных λ_b)		
	272 нм	362 нм	424 нм
4,9	394 $\pm$ 23	1613 $\pm$ 107	600 $\pm$ 51
6,9	384 $\pm$ 28	1590 $\pm$ 104	647 $\pm$ 50
8,9	400 $\pm$ 13	1668 $\pm$ 40	666 $\pm$ 58
9,9	369 $\pm$ 21	1525 $\pm$ 67	627 $\pm$ 24
12,4	369 $\pm$ 31	1539 $\pm$ 103	649 $\pm$ 41
15,4	383 $\pm$ 15	1505 $\pm$ 36	587 $\pm$ 28
16,8	386 $\pm$ 22	1456 $\pm$ 95	571 $\pm$ 49
20,4	356 $\pm$ 25	1271 $\pm$ 87	484 $\pm$ 41
23,7	313 $\pm$ 15	1117 $\pm$ 63	420 $\pm$ 28

Для всех длин волн возбуждения имеет место обратная зависимость потока от влажности, но наибольшие значения потоков приходятся на возбуждение 362 нм. Погрешность измерений потоков фотолюминесценции: для Φ_{272} – не более

7,3 %, для Φ_{362} – не более 6,8 %, для Φ_{424} – не более 8,7 %.

Также были вычислены статистические параметры спектров возбуждения. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические параметры спектров возбуждения размола кукурузы при изменении влажности
Statistical parameters of excitation spectra of corn grinding with changing humidity

Влажность W , %	M_λ	σ^2	As	Ex
4,9	376	3591	0,596	1,025
6,9	378	3754	0,611	0,952
8,9	380	3633	0,611	0,993
9,9	380	3754	0,603	0,917
12,4	381	3823	0,592	0,859
15,4	380	3805	0,571	0,854
16,8	381	3877	0,588	0,825
20,4	382	3952	0,501	0,714
23,7	383	3922	0,522	0,738

Изменение математического ожидания, дисперсии, асимметрии при изменении влажности незначительно (при изменении влажности в 4,8 раза изменение всего на 1,8; 9,2 и 14 % соответственно). Для эксцесса изменение составляет 39 % и статистически достоверно (коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$) зависимость $As(W)$ может быть аппроксимировано линейной функцией. Однако проблема практической реализации возможного метода контроля заключается в сложности из-

мерения величины эксцесса, так как требуется измерение всего спектра возбуждения.

Для зерна пшеницы также были измерены спектры возбуждения. Их общий вид и тенденции изменения в зависимости от влажности аналогичны кукурузному зерну, за исключением смещения коротковолнового максимума с 272 на 282 нм. Для длин волн возбуждения 282, 362 и 424 нм были измерены спектры фотолюминесценции размолотых зерен пшеницы. Пример для $\lambda_b = 362$ нм представлен на рис. 4.

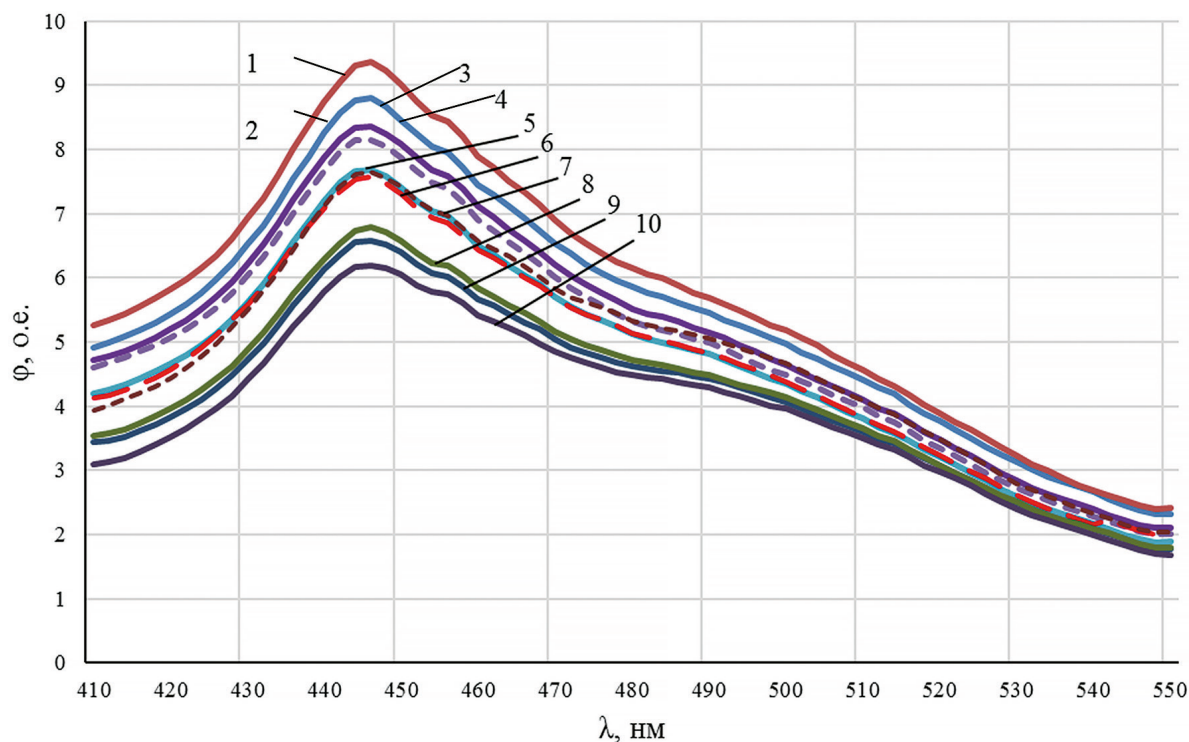


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции размола пшеницы различной влажности для $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм: 1 – 5,3 %, 2 – 3,3 %, 3 – 7,3 %, 4 – 8,3 %, 5 – 10,0 %, 6 – 12,2 %, 7 – 13,8 %, 8 – 14,3 %, 9 – 13,0 %, 10 – 16,6 %
Photoluminescence spectra of wheat flour of different moisture content for $\lambda_{\text{в}} = 362$ nm

Из рисунка видно, что за исключением участка низких влажностей (3,3–5,3 %) кривые системно снижаются при увеличении влажно-

сти зернового размола. Интегральные потоки фотолюминесценции для различных длин волн возбуждения представлены в табл. 4.

Таблица 4

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции размола пшеницы при изменении влажности
Integral parameters of photoluminescence spectra of wheat milling with changes in humidity

Влажность W , %	$\Phi \pm \Delta\Phi$, о. е. (для различных $\lambda_{\text{в}}$)		
	282 нм	362 нм	424 нм
3,3	260±15	778±61	340±29
5,3	285±21	817±66	336±24
7,3	269±21	732±69	290±27
8,3	269±27	703±89	260±24
10,0	263±29	664±88	247±23
12,2	282±13	663±89	241±21
13,0	247±31	598±83	219±24
13,8	272±17	687±63	235±19
14,3	248±13	603±43	222±24
16,6	228±20	562±66	193±19

Из табл. 4 видно, что при возбуждении излучением 362 нм получается наибольший сигнал, однако максимальная погрешность определения потока составляет 13,9 % против 11,0 % при возбуждении 424 нм. Кроме того, для линейной аппроксимации зависимости $\Phi(W)$ в 1,55 раза выше

чувствительность и коэффициент детерминации составляет 0,93 против 0,83 у $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм.

Результаты расчета статистических параметров спектров возбуждения размолов пшеницы представлены в табл. 5.

Таблица 5

Статистические параметры спектров возбуждения размола пшеницы при изменении влажности
Statistical parameters of excitation spectra of wheat milling with changing humidity

Влажность W , %	M_λ	σ^2	As	Ex
3,3	353	4412	0,625	0,057
5,3	351	4413	0,669	0,112
7,3	349	4487	0,677	0,070
8,3	348	4457	0,683	0,101
10,0	346	4534	0,738	0,118
12,2	348	4567	0,722	0,121
13,0	349	4815	0,716	0,015
13,8	348	4626	0,709	0,051
14,3	347	4713	0,728	0,025
16,6	347	4775	0,744	0,039

Зависимости всех представленных в табл. 5 параметров от влажности не являются статистически достоверными. Кроме того, их относительное изменение при пятикратном увеличении влажности является незначительным.

Таким образом, для статистически достоверного определения влажности размолотого зерна

целесообразно использовать потоки фотолюминесцентного излучения Φ при возбуждении излучением с длинами волн 362 и 424 нм. Зависимости потока фотолюминесценции от влажности зерновых размолов и их линейные аппроксимации для кукурузы и пшеницы представлены на рис. 5.

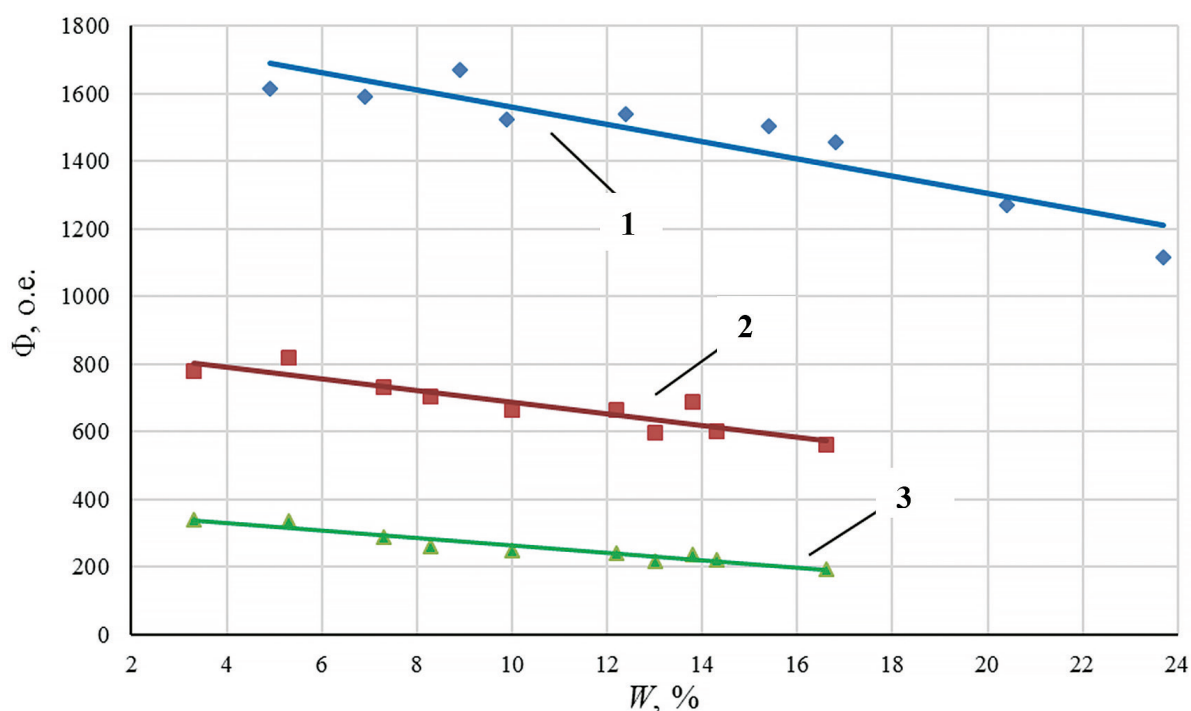


Рис. 5. Зависимости потока фотолюминесценции от влажности зернового размола и их линейные аппроксимации: 1 – кукуруза ($\lambda_b = 362$ нм), 2 – пшеница ($\lambda_b = 362$ нм), 3 – пшеница ($\lambda_b = 424$ нм)

Dependences of photoluminescence flux on grain grinding moisture content and their linear approximations

Для практической реализации методики необходимы обратные зависимости влажности корма

от потока фотолюминесценции, представленные уравнениями:

$$W_{\text{кукурузы}} = -0,033\Phi_{362} + 61,91, \quad (1)$$

$$W_{\text{пшеницы}} = -0,049\Phi_{362} + 43,41, \quad (2)$$

$$W_{\text{пшеницы}} = -0,084\Phi_{424} + 32,11. \quad (3)$$

Таким образом, методика люминесцентного контроля содержания влаги при приготовлении кормов (на примере размолотых зерен кукурузы и пшеницы) включает в себя следующие действия:

- помещение исследуемого образца корма в темную светонепроницаемую камеру;
- возбуждение люминесценции излучением 362 нм для кукурузы (возможно и для пшеницы) или 424 нм для пшеницы;
- регистрация фотолуминесцентного потока излучения в диапазонах 410–550 нм и/или 500; 650 нм;
- вычисление значения влажности по формулам (1)–(3).

Достоверность калибровочных уравнений обосновывается значением коэффициента детерминации, который превышает значение 0,85 для каждого уравнения (1), (2) и (3) – $R^2 \geq 0,85$.

В дальнейшем, для разработки реализующего методику прибора, необходимо из компромиссных соображений выбрать длину волны возбуждения размолотой пшеницы: для большей точности измерений необходимо использовать $\lambda_b = 424$ нм, а

для удешевления прибора и увеличения уровня фотосигнала – $\lambda_b = 362$ нм.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для кормов, приготовленных из размолотого зерна, с увеличением влажности снижаются фотолуминесцентные свойства: спектры смещаются вниз, интегральные параметры уменьшаются.

2. Статистически достоверные зависимости от влажности можно получить для интегральных потоков фотолуминесценции при возбуждении излучением 362 нм для размолов кукурузы и 362 и 424 нм для размолов пшеницы. Такие параметры, как математическое ожидание, дисперсия, асимметрия и эксцесс использовать нецелесообразно из-за отсутствия статистической достоверности, низкой чувствительности либо из-за сложности измерений.

3. Методика люминесцентного контроля содержания влаги в кормах из размолотой кукурузы и пшеницы включает в себя измерение в светонепроницаемой камере потока фотолуминесценции при возбуждении излучением 362 и 424 нм с последующим вычислением влажности по полученной линейной зависимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Improving LIBS analysis of non-flat heterogeneous samples by signals mapping* / V.N. Lednev, P.A. Sdvizhenskii, A.S. Dorohov [et al.] // *Applied Optics*. – 2023. – Т. 62, № 8. – Р. 2030. – DOI: 10.1364/ao.473111.
2. *Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies* // *Agricultural Engineering*. – 2024. – Т. 26, № 3. – Р. 51–57. – DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-51-57.
3. *Fluorescence mapping of agricultural fields utilizing drone-based lidar* / V.N. Lednev, M.Ya. Grishin, P.A. Sdvizhenskii [et al.] // *Photonics*. – 2022. – Т. 9, № 12. – Р. 963. – DOI: 10.3390/photonics8120563.
4. Галеев Р.Р., Самарин И.С., Андреева З.В. Влияние погодных условий на урожайность и качество мягкой яровой пшеницы в интенсивном земледелии лесостепи Новосибирского Приобья // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. – 2017. – № 4 (45). – С. 9–15.
5. *Оптимизация технологических приемов возделывания кукурузы в нечерноземной зоне России: монография* / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, И.П. Фирсов, И.Н. Гаспарян. – М., 2015. – 329 с.
6. Штейнберг Т.С., Семикина Л.И. Разработка систем оценки качества зернопродуктов по оптическим характеристикам // *Контроль качества продукции*. – 2017. – № 2. – С. 32–37.
7. Шевченко В.А., Соловьев А.М. Влияние основных факторов на формирование урожая кукурузы в различных агротехнологиях // *Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения: сб. мат-ов Междунар. науч.-практ. конф.* – М., 2016. – Т. 2. – С. 54–57.
8. Manickavasagan A., Rathna Priya T.S. Characterising corn grain using infrared imaging and spectroscopic techniques: a review // *Journal of Food Measurement and Characterization*. – 2021. – Vol. 15. – Р. 3234–3249.
9. *Thermal analysis and artificial vision of laser irradiation on corn* / H. Cisneros-Carrillo, C. Hernandez-Aguilar, A. Dominguez-Pacheco [et al.] // *Discover Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2, N 1606.
10. Антонов Р.Ю. Описание зерна моделью случайно-неоднородной оптической среды с целью межлабораторного согласования измерений показателя стекловидности // *Научное приборостроение*. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 84–92. – DOI: 10.18358/np-31-2-i8492.

11. *Применение метода цветовой сегментации в задаче определения однородности кормосмеси* / Ю.А. Иванов, С.Ю. Булатов, О.А. Тареева, Г.С. Малышев // *Техника и технологии в животноводстве*. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 54–63. – DOI: 10.22314/27132064-2024-1-54.
12. *Разработка установки для определения однородности смешивания комбикорма методом цифровой обработки изображений* / С.Ю. Булатов, Е.А. Герасимов, Г.С. Малышев, О.А. Тареева // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. – 2024. – № 1 (53). – С. 124–139.
13. *Оценка качества шерстяного и льняного волокна методом ближней инфракрасной спектроскопии и растровой электронной микроскопии* / С.Л. Белопухов, Е.А. Шанаева, О.А. Жарких [и др.] // *Овцы, козы, шерстяное дело*. – 2023. – № 1. – С. 43–48.
14. *Смешанные посевы кукурузы и зернобобовых культур для совместного силосования* / В.А. Шевченко, А.М. Соловьев, Г.И. Бондарева, Н.П. Попова // *Сельский механизатор*. – 2023. – № 1–2. – С. 28–31.
15. *Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С.* Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 11–18. – DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18.
16. *Куликова Н.Н., Митяков Е.С., Шостко В.И.* Факторы успешного управления проектами цифровой трансформации // *Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы*. – 2024. – № 2. – С. 171–176. – DOI: 10.47576/2949-1894.2024.2.2.021.
17. *Depth Profiles in Maize (Zea mays L.) Seeds Studied by Photoacoustic Spectroscopy* / C. Hernández-Aguilar, A. Domínguez-Pacheco, A. Cruz-Orea, R. Zepeda-Bautista // *International journal of Thermophysics*. – 2015. – Vol. 36. – P. 891–899.
18. *Chen X., Yao Z., He D.* Investigation of Optical Properties and Activity of Wheat Stripe Rust Urediospores // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13, N 1316. – DOI: 10.3390/agriculture13071316.
19. *Зиенко С.И., Беляков М.В., Малышкин В.В.* Новые методы и средства спектрально-люминесцентного анализа семян растений: монография. – Смоленск: Универсум, 2020. – 184 с.
20. *Беляков М.В.* Оптические спектральные свойства семян растений различной влажности // *Вестник НГИЭИ*. – 2016. – № 4 (59). – С. 38–50.

REFERENCES

1. Lednev V.N., Sdvizhenskii P.A., Dorohov A.S., Gudkov S.V., Pershin S.M., Improving LIBS analysis of non-flat heterogeneous samples by signals mapping, *Applied Optics*, 2023, T. 62, No. 8, pp. 2030, DOI: 10.1364/ao.473111.
2. Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremkov I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y., Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies, *Agricultural Engineering*, 2024, T. 26, No. 3, pp. 51–57, DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-51-57.
3. Lednev V.N., Grishin M.Ya., Sdvizhensky P.A., Kurbanov R.K., Litvinov M.A., Gudkov S.V., Pershin S.M., Fluorescence mapping of agricultural fields utilizing drone-based lidar, *Photonics*, 2022, T. 9, No. 12, pp. 963, DOI: 10.3390/photonics8120563.
4. Galeev R.R., Samarin I.S., Andreeva Z.V., *Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet)*, 2017, No. 4 (45), pp. 9–15. (In Russ.)
5. SHEvchenko V.A., Solov'ev A.M., Firsov I.P., Gasparyan I.N., *Optimizaciya tekhnologicheskikh priemov vzdelyvaniya kukuruzy v nechernozemnoj zone Rossii* (Optimization of technological methods of corn cultivation in the non-chernozem zone of Russia), Moscow, 2015, 329 p.
6. SHtejnberg T.S., Semikina L.I., *Kontrol' kachestva produkcii*, 2017, No. 2, pp. 32–37. (In Russ.)
7. SHEvchenko V.A., Solov'ev A.M., *Melioraciya i vodnoe hozyajstvo: problemy i puti resheniya* (Land reclamation and water management: problems and solutions), Proceedings of the Conference Title, 2016, pp. 54–57. (In Russ.)
8. Manickavasagan A., Rathna Priya T.S., Characterising corn grain using infrared imaging and spectroscopic techniques: a review, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, Vol. 15, pp. 3234–3249.
9. Cisneros-Carrillo H., Hernandez-Aguilar C., Dominguez-Pacheco A., Cruz-Orea A., Zepeda-Bautista R., Thermal analysis and artificial vision of laser irradiation on corn, *Discover Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, No. 1606.
10. Antonov R.YU., *Nauchnoe priborostroenie*, 2021, T. 31, No. 2, pp. 84–92, DOI: 10.18358/np-31-2-i8492. (In Russ.)
11. Ivanov YU.A., Bulatov S.YU., Tareeva O.A., Malyshev G.S., *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*, 2024, T. 14, No. 1, pp. 54–63, DOI: 10.22314/27132064-2024-1-54. (In Russ.)
12. Bulatov S.YU., Gerasimov E.A., Malyshev G.S., Tareeva O.A., *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2024, No. 1 (53), pp. 124–139. (In Russ.)
13. Belopuhov S.L., SHanaeva E.A., ZHarkih O.A., Dmitrevskaya I.I., Razumeev K.E., ZHEvnerov A.V., YUldashbaeva A.YU., *Ovcy, kozy, sherstyanoje delo*, 2023, No. 1, pp. 43–48. (In Russ.)
14. SHEvchenko V.A., Solov'ev A.M., Bondareva G.I., Popova N.P., *Sel'skij mekhanizator*, 2023, No. 1–2, pp. 28–31. (In Russ.)

15. Morozov N.M., Kirsanov V.V., Cench YU.S., *Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*, 2023, T. 17, No. 1, pp. 11–18, DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18. (In Russ.)
16. Kulikova N.N., Mityakov E.S., SHostko V.I., *Innovacionnaya ekonomika: informaciya, analitika, prognozy*, 2024, No. 2, pp. 171–176, DOI: 10.47576/2949-1894.2024.2.2.021. (In Russ.)
17. Hernández-Aguilar C., Domínguez-Pacheco A., Cruz-Orea A., Zepeda-Bautista R., Depth Profiles in Maize (*Zea mays* L.) Seeds Studied by Photoacoustic Spectroscopy, *International journal of Thermophysics*, 2015, Vol. 36, pp. 891–899.
18. Chen X., Yao Z., He D., Investigation of Optical Properties and Activity of Wheat Stripe Rust Urediospores, *Agriculture*, 2023, Vol. 13, No. 1316, DOI: 10.3390/agriculture13071316.
19. Zienko S.I., Belyakov M.V., Malyshkin V.V., *Novye metody i sredstva spektral'no-lyuminescentnogo analiza semyan rastenij* (New methods and means of spectral-luminescent analysis of plant seeds), Smolensk: Universum, 2020, 184 p.
20. Belyakov M.V., *Vestnik NGIEI*, 2016, No. 4 (59), pp. 38–50. (In Russ.)

Информация об авторах:

М.В. Беляков, доктор технических наук, главный научный сотрудник

Е.А. Никитин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Ф.Е. Владимиров, научный сотрудник

Contribution of the authors:

M.V. Belyakov, Doctor of Technical Sciences

E.A. Nikitin, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher

F.E. Vladimirov, researcher

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.