



Казимиренко Ю. А.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ РЕНТГЕНОЗАЩИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Исследована эффективность применения новых металlostеклянных материалов и покрытий для защиты от рентгеновских излучений. Установлен эффект ослабления рентгеновских излучений полыми стеклянными микросферами, сплошными частицами натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекол, субструктурными элементами, что позволяет управлять процессами формирования рентгенозащитных свойств. Результаты исследований могут быть применены для проектирования защиты от рентгеновских излучений для объектов энергетики, транспорта.

Ключевые слова: композиционные материалы, электродуговые покрытия, коэффициент ослабления излучений, свинцовый эквивалент.

1. Введение

Создание новых композиционных материалов и покрытий, обладающих рентгенозащитными свойствами, является актуальной проблемой при проектировании технических средств, предназначенных для перевозки и хранения радиоактивных веществ. Перспективные разработки в этой области направлены на создание унифицированных материалов и покрытий, способных одновременно выполнять несколько функций: сохранять в процессе длительной эксплуатации механические и защитные свойства, а также обладать узкоспециальными характеристиками, обеспечивающими надежную работу конструкций в условиях перепадов температур, интенсивного износа, вибраций.

2. Анализ исследований и публикаций

В работах, посвященных изучению взаимодействия высокоинтенсивных потоков энергии с веществом [1–4], выделены преимущества применения структурно-неоднородных гетерогенных материалов и покрытий. Рентгенозащитные гетерогенные композиции представляют собой специфический класс функциональных материалов, для изготовления которых применяют полидисперсные частицы свинцовосодержащих стекол, углеродные, стеклянные и металлизированные микросферы, равномерно расположенные в матричном каркасе и ослабляющие действие излучения [2], [4]. Существенным недостатком композиций с полимерной матрицей является пластическое течение связующего на поверхности раздела наполнитель — матрица, возникающее в результате тепловых эффектов, сопровождающих действие рентгеновского излучения (РИ). Уменьшение деформаций, возникающих в структуре полимерных гетерогенных материалов, достигается в результате использования металлизированных стеклянных микросфер [4]. Однако большинство полимеров при взаимодействии с РИ подвержены деструктивным процессам, ведущим к потере работоспособности конструкций. Результаты представленных в работах [5–7] исследований показав-

ли целесообразность применения металlostеклянных композиционных материалов и покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами, порошками свинцовосодержащего и натрийсиликатного стекол. К ним относятся стеклоалюминиевые горячепрессованные композиционные материалы (КМ), полученные в результате спекания полых стеклянных микросфер с порошком или пудрой алюминия [6], а также металlostеклянные электродуговые покрытия из Св-08Г2С и Св-АМг5 [7]. Однако способность ослаблять и поглощать РИ является структурно-чувствительной характеристикой, зависящей от состава композиций, объемного содержания наполнителя, формирования структурных элементов и поверхности раздела матрица — наполнитель.

3. Формирование целей и задач

Цель работы — установить закономерности формирования металlostеклянных материалов и покрытий, обеспечивающие повышение рентгенозащитных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо экспериментально исследовать структуру и рентгенозащитные свойства композиционных материалов и покрытий и на основании полученных результатов проанализировать особенности ослабления рентгеновских излучений структурными элементами.

4. Формирование структуры и рентгенозащитных свойств металlostеклянных материалов и покрытий

4.1. Научные представления и критерии оценки рентгенозащитных свойств композиционных материалов и покрытий. В основу проведения исследований положены научные представления о взаимодействии ионизирующих излучений с гетерогенными материалами [4]; основные положения радиационного материаловедения [1]; гипотезы о полиморфных превращениях в стеклах [3]; научные представления о формировании ультрадисперсной структуры в электродуговых покрытиях в процессе предкристаллизационной термической обработки [8].

Информативными параметрами рентгенозащитных свойств следует считать коэффициент ослабления (поглощения) РИ μ и свинцовый эквивалент, выраженный толщиной слоя свинца, обеспечивающего при заданных условиях такую же защиту, как и рассматриваемый материал [9]. Однако данные характеристики непосредственно зависят от толщины исследуемых образцов и не учитывают физические и структурные характеристики материалов. Поэтому в работе в качестве показателей рентгенозащитных свойств приняты удельные характеристики: массовый коэффициент $\mu_{\text{мас}}$ ослабления (поглощения) РИ, равный отношению линейного коэффициента μ к плотности ρ композиционного материала или покрытия; удельный свинцовый эквивалент $\delta'_{\text{рб}}$, равный значению свинцового эквивалента, отнесенного к толщине образца. Выбранные характеристики находят из закона Бэра-Ламберта (1) по результатам измерений интенсивности потока РИ [1, 3]

$$I = I_0 e^{-\mu \delta}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность падающего потока излучения; I — интенсивность прошедшего потока излучения; δ — толщина ослабляющего слоя материала или покрытия; μ — линейный коэффициент ослабления, который определяется свойствами материала, видом и энергией излучения.

Массовый коэффициент ослабления излучения $\mu_{\text{мас}}$ является структурно-чувствительной характеристикой, а значения удельного свинцового эквивалента $\delta'_{\text{рб}}$ могут быть использованы для выбора толщины защитного слоя покрытий для нанесения на конструкции технических средств.

4.2. Материалы и методика проведения исследований. Для исследований выбраны горячепрессованные стеклоалюминиевые КМ и металlostеклянные электродуговые покрытия. Стеклоалюминиевые КМ получали горячим прессованием формовочной смеси, состоящей из 50 % (объемных) полей стеклянных микросфер (ПСМ) марки МС-А-9 (ТУ 6-48-108-94) и 50 % (объемных) порошковой продукции алюминия, в качестве которой использовали порошок марки ПА-5 (ГОСТ 6058-73) и пудру марки АПС-1А (ГОСТ 5494-95). Технология получения материалов изложена в работе [6], температура спекания составила 600 °С, давление прессования — 0,7 МПа, время изотермической выдержки 30 мин. Металlostеклянные покрытия формировали электродуговым методом из цельнотянутых проволок Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) и Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75). В качестве наполнителя использовали ПСМ натрийсиликатного состава марки МС-А-9 (ТУ 6-48-108-94) фракции 20...80 мкм, порошки натрийсиликатного (ГОСТ 24315-80) и свинцовосодержащего (ГОСТ 9541-75) стекол фракции 10...90 мкм, полученные механическим измельчением бытовых отходов. Покрытия толщиной 2...4 мм наносили на подложку из Ст 3 (ГОСТ 380-94), технология и режимы нанесения покрытий подробно изложены в работе [6].

Плотность образцов определяли гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 25281-82, по результатам которого также рассчитывали пористость. Микроструктурные исследования осуществляли методами электронной и оптической микроскопии соответственно при помощи электронного микроскопа-микроанализатора

РАЭММА-102-02 и металлографического микроскопа ММР-2Р. Объемное содержание стеклянных включений в составе электродуговых покрытий определяли при помощи методов количественной металлографии. Качественный фазовый рентгеноструктурный анализ образцов выполнен на установке ДРОН-3, съемка дифрактограмм проводилась с плоских шлифов в излучении меди $\text{Cu}_{k\alpha} = 1,54178$. Формирование субмикроструктурных элементов в структуре композиций оценивали по размерам областей когерентного рассеивания (ОКР).

Для экспериментальных исследований рентгенозащитных свойств металlostеклянных материалов и покрытий использовали рентгеновскую установку ДРОН-3. При проведении экспериментальных работ в качестве источника излучения использовали трубку с медным анодом $\text{Cu}_{k\alpha} = 1,54178$, режимы работы которой были подобраны экспериментально: напряжение $U = 15...20$ кВ; ток накала $I = 8...12$ мА. Экспозиционная доза составила 10^5 Р/мин, время выдержки при данном излучении 1 мин. Методика проведения исследований разработана на кафедре материаловедения и технологии металлов Национального университета кораблестроения (г. Николаев) и изложена в работе [5]. В ходе проведения экспериментальных работ интенсивность падающего потока излучения I_0 и потока излучения I , прошедшего через образец толщиной δ . В качестве эталона использовали образец листового свинца марки С0 (ГОСТ 3778-98) плотностью 11340 кг/м³ и толщиной 10 мм.

Для исследований использовали образцы металlostеклянных электродуговых покрытий с объемным наполнением стеклом 40 ± 7 %, сформированных без подложки. Для сравнения рентгенозащитных свойств новых металlostеклянных материалов и покрытий параллельно были исследованы образцы: электродуговых покрытий из Св-08Г2С и Св-АМг5 без наполнителя, полученных при аналогичных технологических режимах [7]; дисперсно-наполненные алюминиевые КМ типа САП систем Al-Al₂O₃ и Al-SiC [9]; сферопластики марки ЭДС-7А и с дополнительной воздушной пористостью (30 %) [4], синтактическое пеностекло, полученное в результате спекания ПСМ без связующих добавок [5, 6]. Данные композиции используются в промышленности для защиты от ионизирующих излучений.

4.3. Взаимодействие рентгеновских излучений с композиционными материалами и покрытиями. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Полученные результаты показали, что рентгенозащитные свойства предложенных металlostеклянных материалов и покрытий находятся на уровне традиционно применяемых. Если сравнивать рентгенозащитные свойства горячепрессованных стеклоалюминиевых КМ (композиций ПСМ — ПА5 и ПСМ — АПС-1А), материалов систем Al — Al₂O₃ и Al — SiC, и группы синтактиков, традиционно применяемых в атомной энергетике, то при равном свинцовом эквиваленте значения массового коэффициента ослабления РИ на 20...25 % превышает $\mu_{\text{мас}}$ алюмоматричных КМ и в 2—3 раза — синтактиков.

Среди электродуговых покрытий повышенный эффект ослабления РИ характерен для композиций, наполненных полыми стеклянными микросферами, что объясняется механизмом взаимодействия рентгеновских излучений с ПСМ (рис. 1).

Таблица 1

Рентгенозащитные свойства композиционных материалов и покрытий

Материал	Плотность, ρ , г/см ³	Пористость, П, %	Массовый коэффициент ослабления РИ, $\mu_{\text{мас}}$, см ² /г	Удельный свинцовый эквивалент $\delta'_{\text{Рб}}$
Св-АМг5	1,70	12	7,9	0,35
Св-АМг5 — ПСМ	1,48	22	18,6	0,75
Св-АМг5 — натрий-силикатное стекло	1,77	15	14,19	0,65
Св-АМг5 — свинцово-содержащее стекло	1,86	17	14,5	0,7
ПСМ — ПА5	1,20	10	18,4	0,6
ПСМ — АПС1А	1,10	6	14,9	0,45
Al-Al ₂ O ₃	1,72	7	13,5	0,6
Al-SiC	2,0	3	14,0	0,75
Св-08Г2С	7,00	17	2,46	0,6
Св-08Г2С — ПСМ	5,90	22	4,93	0,75
Св-08Г2С — натрий-силикатное стекло	7,026	19	2,99	0,45
Св-08Г2С — свинцово-содержащее стекло	7,064	20	3,03	0,5
Синтактическое пеностекло	0,360	20	14,6	0,14
Сферопластик ЭДС-7А	0,690	2	7,8	0,14
Сферопластик с дополнительной пористостью	0,580	8	3,6	0,05

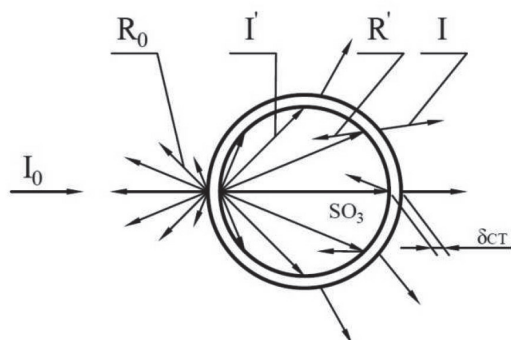
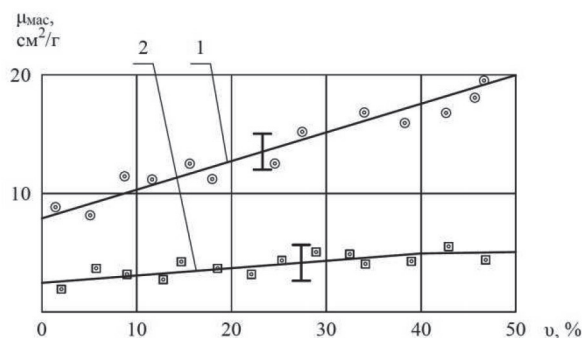


Рис. 1. Взаимодействие РИ с полый стеклянной микросферой

При прохождении рентгеновских лучей сквозь полую стеклянную микросферу поток I_0 частично отражается от стеклянной оболочки (поток R_0), частично поглощается толщиной стенки δ , затем — газовой средой SO_3 , которая находится внутри сферы [10], потом далее поглощается стенкой микросферы; на выходе наблюдается поток I . Внутри микросферы поток I' частично отражается от стенки микросферы (поток R'_0). Таким образом, при прохождении сквозь ПСМ поток энергии I_0 — I преодолевает три преграды, т. е. поглощается трижды. Такого эффекта «тройного поглощения» не наблюдается при взаимодействии потока РИ со сплошной стеклянной частицей. Следовательно, увеличение объемного содержания ПСМ в составе композиций способствует увеличению поглощенной энергии. Экспериментально полученная зависимость (рис. 2) носит линейный ха-

рактер: с увеличением в составе композиций объемного содержания ПСМ до 50 % (объемных) значения массового коэффициента ослабления рентгеновских излучений электродуговыми покрытиями повышаются почти вдвое, что следует учитывать при оптимизации состава. Однако к недостаткам формирований металlostеклянных покрытий методом электродугового напыления следует отнести технологические ограничения при увеличении ПСМ в составе покрытий вследствие их низкой плотности [6].

Рис. 2. Зависимость $\mu_{\text{мас}}$ для электродуговых покрытий от объемного содержания v ПСМ: 1 — Св-АМг5; 2 — Св-08Г2С

Структура металlostеклянных материалов и покрытий представляет собой пористую стальную или алюминиевую матрицу с равномерно распределенными полидисперсными стеклянными включениями, сохраняющими в процессе формирования аморфное состояние. Особенностью структуры электродугового покрытия композиции Св-08Г2С — ПСМ является формирование на поверхности раздела металл — стекло силицида железа Fe_5Si_3 с ОКР 87 нм. На рис. 3 представлены микроструктуры и фрагменты дифрактограмм электродуговых покрытий из Св-08Г2С и Св-АМг5 с объемным наполнением микросферами $40 \pm 7\%$.

При равном свинцовом эквиваленте значения массового коэффициента ослабления РИ композицией Св-АМг5 — ПСМ почти в три раза превышают $\mu_{\text{мас}}$ композиции Св-08Г2С — ПСМ, что связано с их более низкой плотностью. Повысить массовый коэффициент ослабления РИ для композиции Св-08Г2С — ПСМ возможно путем проведения предрекристаллизационной термической обработки при температуре начала рекристаллизации стали, кратковременной выдержке и охлаждении на воздухе [7, 8]. В результате термообработки на поверхности раздела сталь — стекло происходит полиморфное превращение: соединение Fe_5Si_3 с размером ОКР 87 нм превращается в Fe_5Si с размером ОКР 75 нм, а в структуре стальной матрицы формируется субмикроструктурная структура с размером ОКР 97 нм. Проведенные экспериментальные исследования показали, что массовый коэффициент ослабления РИ увеличивается на 27 %, что связано с эффектом перераспределения энергии вторичным электронным излучением, характерным для ультрадисперсных материалов и композиций со структурными элементами, имеющих размеры частиц порядка единиц микрометров [4]. Проведенные в работе исследования показали эффективность применения предрекристаллизационной термической обработки, однако предлагаемая

технология вследствие кратковременного нагрева имеет ограничения для крупногабаритных изделий.

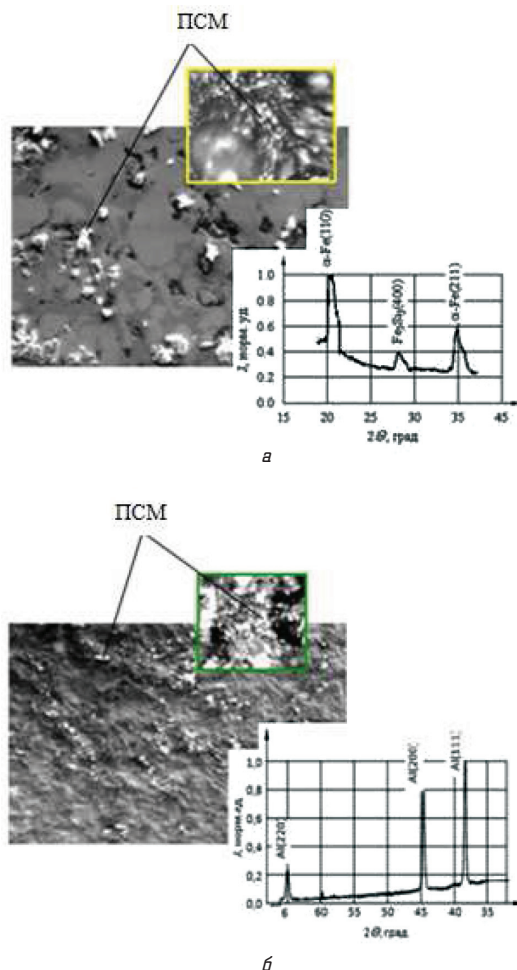


Рис. 3. Микроструктура и фрагменты дифрактограмм металлостеклянных электродуговых покрытий, наполненных ПСМ: *а* — композиция из Св-08Г2С — ПСМ ($\times 120$); *б* — композиция из СвАМг5 — ПСМ ($\times 90$)

Следует отметить, что при взаимодействии потока РИ с металлостеклянными композициями, наполненными стеклянными частицами натрийсиликатного и свинцовосодержащего составов, также наблюдается эффект ослабления, который усиливается при объемном наполнении стеклом. Принимая во внимание основные положения радиационного оптического материаловедения [1] следует, что часть проходящего потока R_0 отражается от стенки частицы и следующая часть потока поглощается сплошной стеклянной средой. При взаимодействии излучения с веществом прозрачной частицы во всем ее объеме возникает сплошное упругое рассеяние энергии излучения, причем в областях фокусировки внутреннего оптического поля оно наиболее интенсивно. Так, введение в состав электродуговых покрытий из Св-08Г2С и Св-АМг5 до 50 % (объемных) порошковых стеклянных наполнителей повышает значения массового коэффициента ослабления РИ в 2,0...2,5 раза.

4.4. Перспективы дальнейших исследований и применения металлостеклянных материалов и покрытий. Полученные результаты экспериментальных

исследований показали, что рентгенозащитные свойства металлостеклянных материалов и покрытий не уступают характеристикам отечественных и зарубежных аналогов, что позволяет рекомендовать их для дальнейшего применения в условиях рентгеновского излучения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с углубленным изучением термомеханического воздействия РИ на металлостеклянные материалы и покрытия, прогнозированием стабильности их структуры и свойств в условиях длительной эксплуатации.

5. Выводы

1. Установлен эффект ослабления РИ полыми стеклянными микросферами, который положен в основу формирования рентгенозащитных свойств композиционных материалов и покрытий: при прохождении сквозь микросферу происходит тройное поглощение потока энергии, которое усиливается при увеличении объемного содержания микросфер в составе композиций.

2. Установлен эффект повышения массового коэффициента ослабления РИ на 27 % для покрытий композиции Св-08Г2С — ПСМ в результате формирования субструктурных элементов с размером ОКР 75...97 нм в стальной матрице и на поверхности раздела металл — стекло путем проведения предрекристаллизационной термической обработки.

3. Введение в состав электродуговых покрытий из Св-08Г2С и Св-АМг5 до 50 % (объемных) порошковых стеклянных наполнителей повышает значения массового коэффициента ослабления РИ в 2...2,5 раза.

4. Полученные результаты показали, что рентгенозащитные свойства металлостеклянных материалов и покрытий находятся на уровне алюмоматричных и синтактических композитов: при равных значениях свинцового эквивалента массовый коэффициент ослабления РИ для горячепрессованных композиций ПСМ — ПА5 и ПСМ — АПС1А на 20...25 % превышает значения $\mu_{\text{мас}}$ алюмоматричных КМ системы Al-Al₂O₃ и Al-SiC и в 2–3 раза — синтактиков.

Литература

- Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения: Учебное пособие [Текст] / В. И. Арбузов. — СПб : СПбГУИТМО, 2008. — 284 с.
- Бакулин, В. Н. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композитные конструкции [Текст] / В. Н. Бакулин, В. М. Грибанов, А. В. Острик, Е. А. Романинова, А. А. Чепрунов. — М. : Наука, 2008. — 256 с.
- Бреховских, С. М. Радиационные эффекты в стеклах [Текст] / С. М. Бреховских, Ю. Н. Викторова, Л. М. Ланда. — М. : Энергоиздат, 1982. — 184 с.
- Острик, А. В. Термомеханическое действие рентгеновского излучения на многослойные преграды в воздухе [Текст] / А. В. Острик. — М. : НТЦ «Информтехника», 2003. — 160 с.
- Казимиренко, Ю. А. Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами [Текст] / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карлеченко, С. И. Шкурат, А. А. Жданов // 36. науч. прайс НУК: Миколаїв : НУК, 2009. — Вип. № 2(425). — С. 105–109.
- Казимиренко, Ю. А. Структурные особенности формирования металлостеклянных композиционных материалов на основе полых стеклянных микросфер [Текст] / Ю. А. Казимиренко,

- Г. В. Волков // Зб. наук. праць НУК: Миколаїв: НУК, 2006. — Вип. № 6(411). — С. 81–86.
7. Казмиренко, Ю. А. Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами [Электронный ресурс] / Ю. А. Казмиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов, К. О. Тумаков // «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : НУК, 2012, № 3. — Режим доступу: \www/ URL: http://ev.nuos.edu.ua.
 8. Дубовий, О. М. Вплив передкристиалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів і сплавів [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів. — Київ, 2010. — № 3(55) — С. 7–10.
 9. Ма, Б. М. Материалы ядерных энергетических установок [Текст] : пер. с англ. / Б. М. Ма. — М. : Энергatomиздат, 1987. — 408 с.
 10. Будов, В. В. Выбор состава стекла для получения полых стеклянных микросфер [Текст] / В. В. Будов, В. Я. Стеценко // Стекло и керамика. — 1988. — № 8. — С. 15–16.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛОСКЛЯНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ РЕНТГЕНОЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Досліджено можливість застосування нових металоскляних матеріалів і покриттів для захисту від рентгенівських

випромінювань. Встановлено ефект ослаблення рентгенівських випромінювань порожніми скляними микросферами, сполоненими частками натрійсилікатного і свинцевомісткого скла, субструктурними елементами, що дозволяє управляти процесами формування рентгенозахисних властивостей. Результати досліджень можуть бути застосовані для проектування захисту від рентгенівських випромінювань для об'єктів енергетики, транспорту.

Ключові слова: композиційні матеріали, електродугові покриття, коефіцієнт ослаблення випромінювань, свинцевий еквівалент.

Казмиренко Юлія Алексеевна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Україна, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com; uakazi@mksat.net.

Казмиренко Юлія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Україна.

Kazymyrenko Yuliia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com; uakazi@mksat.net

УДК 519.712.2:664.8.07

Кітєв М. О.

ПОСТАНОВКА ТА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РАЦІОНУ ГОДІВЛІ ТВАРИН

Обґрунтовано задачу оптимізації раціону кормів при створенні автоматизованого виробництва комбікормів та преміксів. Виконана математична постановка задачі лінійного програмування, побудована цільова функція, обрано метод вирішення задачі та розроблено програмне забезпечення для реалізації методу. Вхідні дані та отриманий рецепт розміщені в електронній таблиці MS Excel, а обробку здійснено за допомогою вбудованої алгоритмічної мови Visual Basic for Application.

Ключові слова: комбікорм, премікс, годування, оптимізація, метод, алгоритм, програмне забезпечення.

1. Вступ

В сучасних умовах економічного розвитку України актуальною є задача раціональної годівлі тварин, приготування корма у суворій відповідності з рецептом для даного виду та призначення тварини. У зв'язку з цим виникає задача створення програмного забезпечення щодо оптимального годування тварин.

2. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Повноцінне годування служить основою високої плодючості і продуктивності дорослих тварин та сприяє дозріванню і збільшенню живої ваги молодяку, що в кінцевому підсумку сприяє підвищенню ефективності тваринництва. Правильне використання кормів — один

з великих резервів збільшення і здешевлення виробництва продуктів тваринництва.

Задача оптимізації плану виробництва кормів важлива для всіх сільськогосподарських підприємств, де є тваринницькі галузі, але найбільш актуальна для господарства тваринницького спрямування, що спеціалізуються на виробництві кормів, так як дозволяє виявити додаткові резерви кормовиробництва за рахунок удосконалення структури посівних площ і витрати кормів. Перш ніж створювати тваринницькі комплекси, необхідно визначити джерела і обсяг надходження кормів. Обґрунтування кормової бази, розрахунок варіантів плану доцільно здійснювати з використанням методів математичного моделювання та ЕОМ [1–3].

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існують різні методи та програмні продукти щодо оптимального годування тварин. Зокрема, конфігурація