

контроля показателей качества готовой полосы в реальном времени. Это позволит реализовать технологию встроенного контроля, которая, согласно концепции бережливого производства, избавит от ряда потерь. Отказ от испытаний окрашенной полосы в отделе технического контроля решает задачу устранения ключевых потерь, связанных с излишней обработкой, не приносящей ценности продукту, хранением смотанных рулонов, ожидающих результатов испытаний, и ненужной транспортировкой отобранных образцов. Устранение ряда потерь позволит снизить время выполнения заказа, что в результате приведет к увеличению оборачиваемости запасов и, следовательно, росту прибыли.

Результаты и перспективы развития.

Использование описанной модели делает возможным прогнозирование полного цветового отклонения полимерного покрытия с точностью 4,7 %. Это позволяет более гибко реагировать на требования клиента, повысить качество продукции, снизить себестоимость и сроки производства.

Полученные результаты являются новыми для данной предметной области. Перспективным видится интеграция разработанной модели в программный комплекс интеллектуального управления процессом полимеризации оцинкованного металлического листа (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013618097 от 29.08.2013, авторы: И. А. Варфоломеев, Е. В. Ершов, Д. В. Богачев, Л. Н. Виноградова). Данный программный продукт позволяет подобрать температурный режим сушки покрытия, обеспечивающий требуемый коэффициент адгезии при минимальном расходе газа, необходимо для нагрева печи. Полученная модель прогнозирования будет выступать дополнительным ограничением, обеспечивающим тот факт, что подобранный температурный режим будет удовлетворять требованиям клиента в части цветового отклонения.

Литература

1. *Владимиров, Ю. В.* Покрытие полимерными материалами стальных листов / Ю. В. Владимир, В. Н. Файнштейн. – М., 1967.
2. *Кудинов, И. Ю.* Интеллектуальные технологии моделирования и управления многосвязными объектами / И. Ю. Кудинов // Информационные технологии. – 2011. – №3. – С. 1–32.
3. *Молчанова, А. А.* Оцинкованный и окрашенный прокат: тенденции производства и потребления / А. А. Молчанова // Снабжение и контракты. – 2013. – № 4. – С. 4–7.
4. *Низина, Т. А.* Экспериментально-теоретические основы прогнозирования и повышения долговечности защитно-декоративных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук / Т. А. Низина. – Саранск, 2007.
5. *Рутковская, Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М., 2006.
6. *Сорокин, Д. А.* Градация цветового различия и идентификация фарфора методами многомерного шкалирования: дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Сорокин. – М., 2009.
7. Стандартизация многокрасочной печати. – URL: http://www.publish.ru/articles/201212_20012953 (дата доступа 03. 01. 2015)
8. Таблица цветов RAL из Классической коллекции. – URL: http://ral.ru/classic_colours (дата доступа 03. 01. 2015)
9. *Федосов, Б. Т.* Многомерные объекты. Описание, анализ и управление / Б. Т. Федосов. – URL: http://model.exponenta.ru/bt/bt_171_MultyDim_Obj_Contr.htm#L005 (дата доступа 03. 01. 2015)
10. CIELab – измерение цвета на различных материалах. – URL: http://www.publish.ru/articles/200403_4050359 (дата доступа 03. 01. 2015)
11. *Field, A.* Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics / A. Field. – SAGE, 2013.
12. Omron Xpectia Vision System Brochure. – URL: <http://www.manualslib.com/manual/347160/Omron-Xpectia-Vision-System.html> (дата доступа 03. 01. 2015)
13. *Stanley, A Mulaik.* Foundations of Factor Analysis / Stanley A Mulaik // CRC Press. – 2009.
14. *Whiston, Br.* Fuzzy Logic Control and the Omron FB-30AT Fuzzy Logic Board / Br. Whiston // Electrical and Electronic Engineering. – University of Auckland, 1993.

УДК 519.67 : 620.9

Т. А. Гаврилов, Г. Н. Колесников, Е. А. Тихонов
Петрозаводский государственный университет

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЯ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ФУНДАМЕНТА ОТ ПРОМЕРЗАНИЯ

Работа выполнена в рамках реализации комплекса мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг. (подпроект: «Совершенствование строительных материалов на основе использования местных ресурсов и отходов переработки древесины»)

Цель работы – улучшение теплоэнергетических и технико-экономических характеристик здания за счет оптимизации защиты фундамента от промерзания по критерию минимума объема утеплителя. В качестве инструмента исследования рассмотрено применение методики факторного эксперимента. В ходе экспериментов рассматривались модельные задачи. При решении этих задач для теплоэнергетических расчетов использовалась программа “ANSYS”. По результатам расчетов были построены регрессионные зависимости. Рассмотрен пример решения задачи двухкритериальной оптимизации теплоизоляции фундамента.

Фундамент, промерзание, температура, теплоизолирующий материал, регрессионные зависимости, "ANSYS".

Improving the building heat-and-power engineering, technical and economic characteristics by optimizing protection foundation from freezing by criterion a minimum amount of insulation was the aim of the article. Application of the method of factorial experiment was considered as a research tool. Model problems were discussed as experiments. The "ANSYS" program was used to solve problems for heat-and-power engineering calculations. Regression relationships were constructed based on the results of the calculations. The example of solving the problem of two-criterion optimization of the foundation heat-insulation was considered in the paper.

Building foundation, freezing, temperature, heat-insulating material, regression equations, "ANSYS".

Введение.

Современные требования ресурсосбережения и энергоэффективности предопределяют актуальность исследований по совершенствованию защиты от промерзания фундаментов зданий и сооружений [4], [6], [7]. К числу недостаточно изученных прикладных задач относится рассматриваемая далее условная оптимизация теплоизоляции фундамента по критерию минимума объема утеплителя при условии, что минимальная температура в любой точке внутренней поверхности фундамента должна быть положительна.

Основная часть.

На рис. 1 указана температура в девяти точках внутренней поверхности фундамента здания с подвалом. В угловой точке температура равна $-0,7^{\circ}\text{C}$, имеет место промерзание фундамента. По этой причине необходима оптимизация теплоизоляции фундамента по критерию минимума объема теплоизолирующего материала при условии, что минимальная температура в любой точке внутренней поверхности фундамента исключает появление конденсата и промерзание. Далее рассмотрена защита фундамента только от промерзания за счет утепления его внешней поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Схема фундамента: температура в девяти точках до оптимизации теплоизоляции (размеры указаны в миллиметрах)

Цель – минимизация расхода теплоизолирующего материала для фундамента при условии, что температура в любой точке внутренней поверхности фундамента не меньше заданного положительного значения.

Исходные данные:

- размеры здания в плане: 12×6 м;
 - температура окружающего воздуха: -28°C ;
 - скорость ветра: 0 м/с;
 - температура грунта на глубине $2,2$ м: $+4^{\circ}\text{C}$;
 - мощность источника тепла: 30 Вт/м².
- Теплопроводность материалов, Вт/(м·К):
- материал стен подвала (бетон): $1,63$;
 - утеплитель фундамента и отмостки (вспененный полиуретан): $0,03$;
 - грунт: $0,67$.

Варьируемые факторы (рис. 1):

- X_1 и X_2 – соответственно, ширина и толщина утеплителя под отмосткой;
- X_3 и X_4 – соответственно, ширина и толщина утеплителя на фундаменте.

В рассматриваемой модельной задаче размеры прямоугольного в плане фундамента по периметру равны: ширина $A = 6$ м, длина $B = 12$ м. Тогда с учетом обозначений по рис. 1 объем утеплителя V будет равен:

$$V = 2 \cdot (A+B+2 \cdot X_1) \cdot X_1 \cdot X_2 + 2 \cdot (A+B+2 \cdot X_4) \cdot X_3 \cdot X_4.$$

Требуется найти такие $X_1, \dots, X_4$, чтобы минимальная температура $t_{\min}$ на внутренней поверхности стен подвального помещения была неотрицательной. При этом объем утеплителя должен быть минимальным.

Записать аналитическое выражение для $t_{\min}$ не удастся, поэтому для определения температуры были использован метод конечных элементов, а в качестве инструмента исследования – программа "ANSYS" [http://ansys.com/]. В рассматриваемом случае имеет место задача двухкритериальной оптимизации. Для численного решения задачи строились регрессионные зависимости $t_{\min}$ от варьируемых параметров $X_1, \dots, X_4$. Эти зависимости были построены с применением методов планирования эксперимента [3], [5].

Задача была решена при ограничениях (рис. 1):

- $500 \leq X_i \leq 1500, i = 1, 2$;
- $50 \leq X_i \leq 150, i = 3, 4$.

Кроме $t_{\min}$ численно определялась также максимальная температура $t_{\max}$ на внутренней поверхности подвального помещения. Значение $t_{\max}$ необходимо для того, чтобы оценить неравномерность распределения температуры по внутренней поверхности стен подвального помещения.

Задача решалась в трехмерной постановке с использованием указанной выше программы “ANSYS”. Для построения регрессионных зависимостей в качестве инструмента инженерного анализа был использован табличный процессор Microsoft Excel, надстройка «Анализ данных».

Исходные данные (матрица планирования эксперимента) и результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица эксперимента и результатов вычислений

Номер эксперимента	X_1 (мм)	X_2 (мм)	X_3 (мм)	X_4 (мм)	V (м ³)	$t_{\max}$ (°C)	$t_{\min}$ (°C)
1	1500	50	500	50	4,05	4,75	0,11
2	500	150	500	50	3,75	4,00	-0,66
3	500	50	1500	50	3,66	4,29	-0,32
4	1500	150	1500	50	12,60	8,42	2,63
5	1500	50	500	150	5,89	6,07	0,62
6	500	150	500	150	5,59	4,69	-0,55
7	500	50	1500	150	9,18	9,70	1,82
8	1500	150	1500	150	17,68	9,46	4,10
9	1000	100	1000	100	7,64	6,03	0,96
10	1000	150	500	150	8,74	8,38	1,63
11	500	100	500	50	2,80	7,27	-0,32
12	1500	100	1500	150	12,69	11,16	4,13
13	500	150	500	100	4,67	4,94	-0,67
14	500	100	1500	150	10,13	7,52	3,15
15	1000	150	1500	50	8,71	7,70	2,81
16	1500	50	1500	100	8,61	7,67	3,62
17	1500	50	1000	150	8,64	8,92	3,17
18	1000	50	1500	50	4,71	6,66	0,85

Была определена регрессионная зависимость объема утеплителя:

$$V = 0,0037024 \cdot X_1 + 0,0425364 \cdot X_2 + 0,0048145 \cdot X_3 + 0,0362164 \cdot X_4 - 8,9969856. \quad (1)$$

Адекватность модели (1) определим коэффициентом множественной корреляции R [3]. В данном случае $R = 0,962$. Чем ближе R к единице, тем выше качество модели.

Аналогично определена регрессионная зависимость $t_{\min}$ от тех же входных параметров $X_1, \dots, X_4$:

$$t_{\min} = 0,0017617 \cdot X_1 + 0,0079000 \cdot X_2 + 0,0023117 \cdot X_3 + 0,0131585 \cdot X_4 - 4,8397471, \quad (2)$$

$R = 0,93446$.

Затем определялся минимум функции (1) при указанных в табл. 2 значениях $t_{\min}$.

В той же табл. 2 приведены оптимизированные значения параметров $X_1, \dots, X_4$.

Используя соотношение (2) для оптимизации теплоизоляции фундамента по критерию минимума объема утеплителя $V \rightarrow \min$ при условии $t_{\min} \rightarrow \max$, получим: $t_{\min} = 4,4$ °C; $V = 15,43$ м³; $X_1 = X_3 = 1500$ мм; $X_2 = X_4 = 150$ мм.

Таблица 2

Результаты оптимизации по критерию $V \rightarrow \min$ при ограничении на $t_{\min}$

$t_{\min}$ (°C)	V (м ³)	X_1 (мм)	X_2 (мм)	X_3 (мм)	X_4 (мм)
0	2,84	500	50	1257	50
1,0	4,94	749	50	1500	50
2,0	7,04	1317	50	1500	50
3,0	9,58	1500	50	1500	101
4,0	13,28	1500	96	1500	150
4,4	15,43	1500	150	1500	150
5,0	Решение не найдено				

Найденное $t_{\min} = 4,4$ °C отличается от значения, вычисленного в эксперименте № 8 (табл. 1), равного 4,1 °C, на ~ 7 %, что объясняется погрешностями численного решения и приближенным характером регрессионной модели (2). Погрешности численного решения зависят от характеристик сетки конечных элементов.

Практический интерес представляют оценки влияния $X_1, \dots, X_4$ на V и $t_{\min}$. Для таких оценок воспользуемся коэффициентами эластичности [3]:

$$E_j = a_j \cdot x_j / y_j, \quad (3)$$

где a_j – коэффициент регрессии фактора x_j ; x_j и y_j – средние значения переменных X_j и Y_j соответственно. Коэффициент эластичности E_j показывает, на сколько процентов изменяется зависимая переменная при изменении фактора на один процент. Находим: E_j , $j = 1, \dots, 4$ для зависимости (1), соответственно, 0,227; 0,102; 0,314; 0,174. Аналогично, для зависимости (2) получим: 1,171; 0,525; 1,622; 0,899. Таким образом, наибольшее влияние как на V , так и на $t_{\min}$, оказывает фактор X_3 . При этом наименьшее влияние оказывает фактор X_2 . Эти данные согласуются с данными табл. 2, а именно: с изменением $t_{\min}$ переменная X_3 достигает своего предельного значения прежде, чем X_2 .

На внутренней поверхности стены температура распределяется неравномерно. Величина разности $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ может служить критерием оптимальности теплоизоляции фундамента. Действительно, чем меньше Δt , тем более равномерным будет распределение толщины утеплителя. Наиболее подвержены промерзанию области в окрестности угловых точек (рис. 1). Поэтому толщину теплоизоляции в углах необходимо увеличить.

Выводы.

Данная рекомендация известна из правил защиты фундаментов от промерзания [6]. Однако в этих правилах рекомендуется увеличивать ширину слоя горизонтальных плит утеплителя в углах фундамента. Результаты работы указывают на целесообразность оптимизации распределения утеплителя по вертикальной поверхности фундамента, оптимизированного по критериям минимума объема утеплителя и максимума минимальной температуры на внутренней поверхности подвального помещения. В качес-

ве утеплителя внутренней поверхности того же помещения могут рассматриваться древесно-цементные материалы [1], [2].

Литература

1. Андреев, А. А. Древесно-цементный композит с добавкой стеатита как конструкционный и демпфирующий материал / А. А. Андреев, Г. Н. Колесников, А. А. Чалкин // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2014. – № 6. – С. 75–78.
2. Андреев, А. А. О рациональном соотношении количества опилок и стружки в древесно-цементном композите / А. А. Андреев, Г. Н. Колесников // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2014. – №4 (141). – С. 85–87.
3. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию

операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э. А. Вуколов. – М., 2008.

4. Мельников, А. В. Влияние теплоизоляции фундаментов на изменение температурного режима сезонно промерзающего основания в районе глубокого сезонного промерзания / А. В. Мельников // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 77–83.

5. Черняев, Л. А. Применение информационных технологий в планировании и обработке результатов факторных экспериментов / Л. А. Черняев, Т. А. Гаврилов // Научно-образовательная информационная среда XXI века: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2014. – С. 202–204.

6. American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 32-01, Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations. – 2001. – URL: <http://www.PUBS.ASCE.org>.

7. Sun, Shu Xia Finite Element Computation Method for Heat Transfer / [Shu Xia Sun et al.] // Advanced Materials Research. – 156 (2011): 766-770. – URL: <http://www.scientific.net/AMR.156-157.766>.

УДК 620.93

О. Б. Колибаба, А. И. Сокольский, Р. Н. Габитов

Ивановский государственный энергетический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ СЛОЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Исследуется процесс конвективной сушки слоя твердых бытовых отходов в экспериментальной установке шахтного типа. На основе исследований получены критериальные уравнения тепло- и массообмена для нахождения критериев Нуссельта и Шервуда. Предложенные уравнения позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в слое твердых бытовых отходов. Полученные решения используются в расчетах при проектировании реакторов для термической переработки многокомпонентного органического сырья, в частности для определения конструктивных параметров зоны сушки.

Твердые бытовые отходы, термическая переработка, конвективная сушка, критериальные уравнения, тепло- и массообмен, влажность, скорость сушки, кривые сушки.

The authors studied the convective drying bed of solid waste in an experimental setup of shaft-type. Based on the research the authors got the criteria equations of heat and mass transfer for finding the Nusselt and Sherwood. The proposed equations enable us to determine the coefficients of heat and mass transfer in the layer of solid waste.

The resulting solutions are used in calculating the design of reactors for thermal processing of multicomponent organic waste, including MSW, and the determination of the design parameters, drying zone, in particular. Further research is necessary to extend the range of the speed of the drying agent to intensify the drying process.

Solid municipal waste, thermal processing, convective drying, dimensionless equations, heat and mass transfer, humidity, drying rate, drying curves.

Введение.

К твердым бытовым отходам (ТБО) относят отходы, образующиеся у населения, в торговых предприятиях, учреждениях, муниципальных службах. ТБО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, включающую бумагу, текстиль, пластмассы, пищевые и растительные компоненты, камни, кости, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стекломой.

Любые ТБО состоят из органической и неорганической составляющих и воды. Вода обуславливает такое важное свойство ТБО как влажность. Наибольший интерес, с точки зрения утилизации ТБО, представляет органическая составляющая, которая

является нетрадиционным энергоносителем, и удельный вес которой в составе ТБО доходит до 85 %.

Широко распространенными технологиями утилизации отходов являются термические методы, к которым относятся пиролиз и газификация. Термическая переработка сырья позволяет получить не только горючий газ, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов и рекультивацией земельных угодий.

Основная часть.

Процесс термической переработки ТБО чаще всего осуществляется в печах шахтного типа (термиче-