

УДК 614.841

Н.Б. Григорьян, Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля,
П.Г. Круковский, д.т.н., проф., Институт технической теплофизики НАН Украины,
С.В. Новак, к.т.н., с. н. с.,
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты ГСЧС Украины

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ОГНЕЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОКРЫТИЙ НЕСУЩИХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложен детальный алгоритм решения обратной задачи теплопроводности, используемый в методе оценки огнезащитной способности огнезащитных покрытий несущих стальных конструкций, приведенном в национальном стандарте Украины ДСТУ Б В.1.1-17. Изложены результаты верификации этого алгоритма, проведенной методом вычислительного эксперимента. Показано, что предложенный алгоритм позволяет получать оптимальные решения обратных задач как для огнезащитных покрытий, для которых теплофизические характеристики существенно зависят от температуры, так и для огнезащитных покрытий с незначительно изменяющимися теплофизическими характеристиками.

Ключевые слова: пожарная безопасность, огнезащитное покрытие, огнезащитная способность, металлическая конструкция, предел огнестойкости, задачи теплопроводности.

Для определения характеристики огнезащитной способности покрытий несущих металлических конструкций широко применяют стандартизованные методы [1], в одном из которых используются уточненная математическая модель процесса теплопроводности и метод решения обратных задач теплопроводности (далее – ОЗТ). В этом методе решением ОЗТ по данным термометрирования, полученным при испытаниях 10 образцов колонн с огнезащитным покрытием (далее – ОЗП) в условиях воздействия стандартного температурного режима, определяют теплофизические характеристики (далее – ТФХ) ОЗП. В национальном стандарте ДСТУ Б В.1.1-17 [1] указан критерий, по которому определяется оптимальное решение ОЗТ, но не приведен детальный алгоритм получения этого решения. Не правильное (не оптимальное) применение алгоритма может приводить к получению решений ОЗТ, отличающихся от правильных, и значительным погрешностям в определении указанным методом характеристики огнезащитной способности ОЗП несущих металлических конструкций. Поэтому целью данной работы является изложение оптимального алгоритма решения ОЗТ для метода оценки огнезащитной способности ОЗП несущих стальных конструкций, основанного на решении уточненного уравнения теплопроводности, приведенного в ДСТУ Б В.1.1-17 [1].

Указанный выше метод содержит такие основные этапы:

- экспериментальное определение температуры θ_a образцов стальных колонн, имеющих различные значения приведенной толщины профиля V/A_p , с ОЗП в условиях стандартного температурного режима;

- определение ТФХ (коэффициента теплопроводности λ_p и удельной объемной теплоемкости $c_p\rho_p$) огнезащитного покрытия в зависимости от температуры путем решения ОЗТ по полученным данным измерения температуры образцов колонн при огневых испытаниях в печах;

- расчет значений необходимой минимальной толщины d_{pmin} ОЗП, которые обеспечивают нормативные пределы огнестойкости t_τ несущих металлических конструкций для заданных величин приведенной толщины профиля V/A_p и критической температуры стали T_{cr} , решением прямой задачи теплопроводности (далее – ПЗТ).

Решения ОЗТ и ПЗТ проводят, используя следующую систему уравнений:

– уравнение теплопроводности:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < d_p; \quad \theta_p = \theta_p(x, t); \quad 0 < t < t_{max},$$

– начальное условие: $\theta_p(x, 0) = \theta_0, \quad (2)$

– граничное условие на внешней поверхности ОЗП при $x = d_p$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p(d_p, t)}{\partial x} = \alpha^* [\theta_t - \theta_p(d_p, t)], \quad (3)$$

где $\alpha^* = \alpha_c + \frac{C_0 \varepsilon}{\theta_t - \theta_p(d_p, t)} \left\{ \left[\frac{\theta_t + 273,15}{100} \right]^4 - \left[\frac{\theta_p(d_p, t) + 273,15}{100} \right]^4 \right\},$

– граничное условие на внутренней поверхности ОЗП при $x = 0$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p(0, t)}{\partial x} = c_a \rho_a \times \frac{V}{A_p} \times \frac{\partial \theta_p(0, t)}{\partial t}, \quad (4)$$

где x – координата в огнезащитном покрытии ($x = 0$ соответствует месту контакта покрытия с металлом, где измеряется температура образца $\theta_a = \theta_p(0, t)$);

t – время, с;

t_{max} – максимальное время нагрева образца, с;

α_c – коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности огнезащитного покрытия ($\alpha_c = 25$ Вт/(м·°C));

$C_0 = 5,67$;

ε – степень черноты поверхности огнезащитного покрытия ($\varepsilon = 0,5$);

θ_0 – начальная температура образца, °C;

θ_t – температура в огневой печи, °C.

При решении ОЗТ, используя уравнения (1) - (4), определяют такие значения коэффициента теплопроводности λ_p и удельной объемной теплоемкости $c_p \rho_p$ огнезащитного покрытия, для которых величина среднеквадратичного отклонения F расчетных $\theta_p(0, t)$ и экспериментальных θ_a значений температуры образцов, найденная по формуле (5), будет минимальна.

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [\theta_p^{j,i}(0, t) - \theta_a^{j,i}]^2}{\sum_{j=1}^m n_j}}, \quad (5)$$

где $j=1, 2, \dots, m$; j -номер испытуемого образца, m – общее количество образцов;

n_j – количество экспериментальных значений температуры $\theta_a^{j,i}$, используемых в формуле (5), для каждого образца с номером j ($j = 1, 2, \dots, m$).

При решении ОЗТ экстремальным путем, основанным на итерационном методе Ньютона – Гаусса поиска минимума функции F и метода регуляризации Тихонова А.Н., рассматривают сплайн-аппроксимацию ТФХ нулевого, первого и третьего порядков (нулевой порядок – постоянные значения, первый – линейная зависимость, третий – кубический сплайн) [2]. Не определенным является алгоритм задания порядка сплайн-аппроксимации ТФХ, количества узловых точек этой аппроксимации и другие параметры, позволяющий получать оптимальное решение.

В данной работе предложен следующий (мы считаем оптимальный) алгоритм решения ОЗТ указанным экстремальным методом. На первом шаге проводится поиск λ_p и $c_p\rho_p$ ОЗП как констант. Значения найденных констант используют в качестве нулевого приближения для следующего шага, на котором проводят поиск $c_p\rho_p$ как константы, а для λ_p применяют сплайн-аппроксимацию первого порядка с двумя узловыми точками по температуре. Полученное решение используют в качестве нулевого приближения для третьего шага, на котором проводят поиск $c_p\rho_p$ как константы, а для λ_p применяют ту же сплайн-аппроксимацию, но уже с тремя узловыми точками по температуре. Увеличение количества узловых точек для этой сплайн-аппроксимации λ_p выполняют до шага, на котором прекращается уменьшение отклонения F . На следующих шагах применяют сплайн-аппроксимацию первого порядка и для удельной теплоемкости $c_p\rho_p$ и такую же процедуру определения количества узлов ее сплайн-аппроксимации, как и для λ_p . В дальнейшем, при необходимости, используют сплайн-аппроксимацию ТФХ третьего порядка. Решение ОЗТ прекращают, если дальнейшее увеличение количества узловых точек по температуре для сплайн-аппроксимации ТФХ огнезащитного покрытия не приводит к уменьшению отклонения F . Решение с наименьшим значением отклонения F принимают в качестве оптимального.

Верификация этого алгоритма была проведена путем вычислительного эксперимента, описанного в [2], по следующей методике.

Решением ПЗТ определяли зависимости температуры θ_a от времени для 10-ти образцов колонн с различной приведенной толщиной профиля и толщиной ОЗП, а также точные значения минимальной толщины $d_{pmin T}$ огнезащитного покрытия.

При решении ПЗТ были использованы зависимости теплофизических характеристик стали, приведенные в европейском стандарте EN 1993-1-2 [3], и рассматривали следующие варианты задания теплофизических характеристик ОЗП:

- постоянные малые значения ТФХ: теплопроводность $\lambda_p = 0,03$ Вт/(м·К), теплоемкость $c_p\rho_p = 3 \cdot 10^4$ Дж/(м³·К);
- постоянные большие значения ТФХ: теплопроводность $\lambda_p = 0,3$ Вт/(м·К), теплоемкость $c_p\rho_p = 3 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К);
- переменные ТФХ, зависящие от температуры, взятые для бетона с 3 % влажностью из европейского стандарта EN 1992-1-2:2004 [4] и приведенные на рис. 1 и рис. 2.

Используя полученные решением ПЗТ точные значения температуры θ_a образцов в качестве экспериментальных, проводили поиск ТФХ огнезащитного покрытия путем решения ОЗТ. Также решения проводили также по «возмущенным» данным по температуре образцов, которые определяли путем внесения с помощью генератора случайных чисел погрешности до 10 % в точные значения температуры θ_a [2].

По результатам решения ОЗТ, рассчитывали значения необходимой минимальной толщины $d_{pmin p}$ ОЗП, которые обеспечивают нормативные пределы огнестойкости t_r несущих металлический конструкций для заданных величин приведенной толщины профиля V/A_p и критической температуры стали T_{cr} , и сравнивали их с точными величинами.

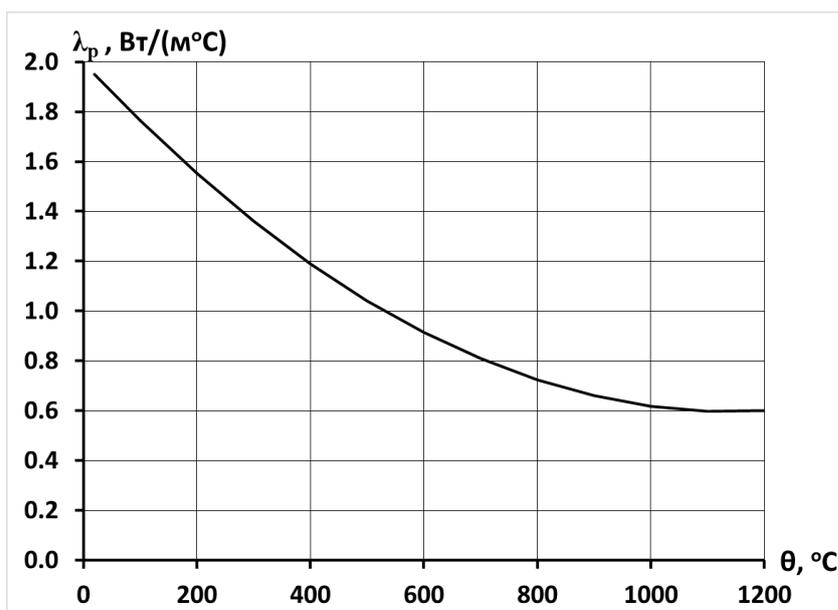


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопроводности ОЗП от температуры, принятая при решении ПЗТ .

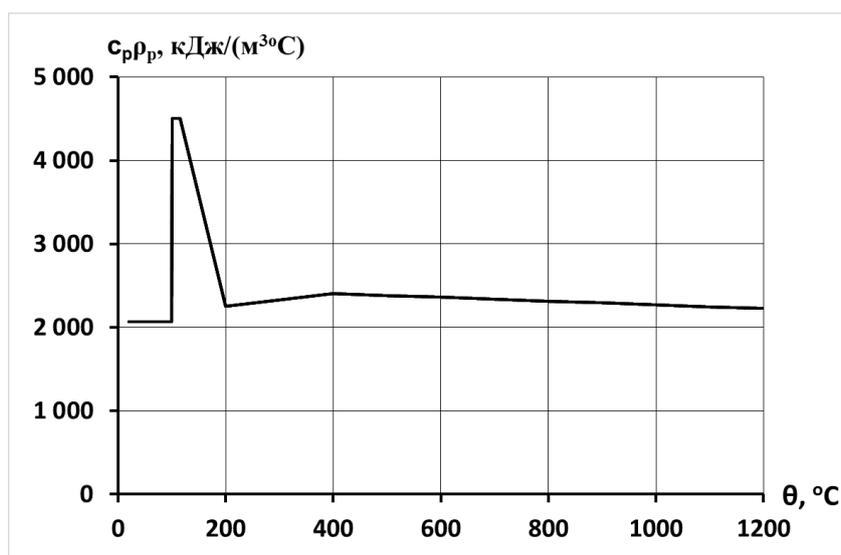


Рисунок 2 – Зависимость удельной объемной теплоемкости ОЗП от температуры, принятая при решении ПЗТ.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты решения ОЗТ для ОЗП с постоянными ТФХ, полученные с использованием возмущенных данных по температуре образцов. Из анализа приведенных в этих таблицах данных следует, что оптимальные решения ОЗТ были получены на 4-х шагах, на которых значения отклонения F составляют 24,07 °С и 21,78 °С для вариантов с малыми и большими ТФХ, соответственно. Эти значения отклонения незначительно (менее чем на 0,4 %) отличаются от величин, полученных на 1-м шаге решения, на котором проводился поиск ТФХ, как констант. Значения ТФХ, полученные на 1-м шаге решения для варианта с малыми ТФХ, отличаются от их точных величин на 0,7 % и 370 % соответственно для λ_p и $c_p \rho_p$. Аналогичная разница в этих значениях для варианта с большими ТФХ составляет 1,7 % и 3 % для λ_p и $c_p \rho_p$, соответственно. На других шагах решения это отличие расчетных значений ТФХ от точных уменьшается незначительно. Большую величину этой разницы для $c_p \rho_p$, которая имеет место для варианта с малыми ТФХ,

можно пояснить низкой чувствительностью температуры образцов на значение удельной объемной теплоемкости ОЗП при малых значениях его коэффициента теплопроводности. Для вариантов с постоянными ТФХ и использованием точных данных по температуре образцов оптимальные решения имеют место на 1-м шаге. Для этих решений отклонение F составляет 0,08 °С, а разница между расчетными и точными значениями ТФХ не превышает 0,03 % и 3 % для λ_p и $c_p\rho_p$, соответственно.

Таблица 1 – Результаты решения ОЗТ для ОЗП с постоянными малыми ТФХ, полученные с использованием возмущенных данных по температуре образцов

№ шага	Порядок сплайн-аппроксимации и количество узловых точек	λ_p , Вт·м ⁻¹ ·°С ⁻¹	$c_p\rho_p$, МДж·м ⁻³ ·°С ⁻¹	F , °С
1	Нулевого порядка: λ и c_p – постоянные	0,0302	0,141	24,16
2	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 2 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,0292$ $\lambda_{1200} = 0,0307$	0,130	24,13
3	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 3 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,0324$ $\lambda_{600} = 0,0292$ $\lambda_{1200} = 0,0317$	0,123	24,09
4	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 4 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,0304$ $\lambda_{400} = 0,0304$ $\lambda_{800} = 0,0295$ $\lambda_{1200} = 0,0329$	0,108	24,07

Таблица 2 – Результаты решения ОЗТ для ОЗП с постоянными большими ТФХ, полученные с использованием возмущенных данных по температуре образцов

№ шага	Порядок сплайн-аппроксимации и количество узловых точек	λ_p , Вт·м ⁻¹ ·°С ⁻¹	$c_p\rho_p$, МДж·м ⁻³ ·°С ⁻¹	F , °С
1	Нулевого порядка: λ и c_p – постоянные	0,305	3,089	21,84
2	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 2 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,296$ $\lambda_{1200} = 0,307$	3,025	21,82
3	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 3 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,306$ $\lambda_{600} = 0,297$ $\lambda_{1200} = 0,0317$	3,029	21,79
4	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 4 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 0,303$ $\lambda_{400} = 0,301$ $\lambda_{800} = 0,299$ $\lambda_{1200} = 0,323$	3,032	21,78

В таблицах 3 и 4 приведены результаты решения ОЗТ для ОЗП с переменными ТФХ, полученные с использованием точных и возмущенных данных по температуре образцов. Из анализа приведенных в этих таблицах данных следует, что оптимальные решения ОЗТ были получены на 8-х шагах, на которых значения отклонения F составляют 0,72 °С и 21,29 °С для вариантов с точными и возмущенными данными, соответственно. Эти значения отклонения значительно отличаются от величин, полученных на 1-м шаге решения, на котором

проводился поиск ТФХ, как констант. Значения F на шагах от 2-го по 8-й отличаются незначительно. Например, для варианта с использованием возмущенных данных это отличие составляет 2,8 % (0,6 °C). В то же время имеет место значительное отличие в значениях удельной объемной теплоемкости ОЗП. В частности, на шагах 2-4 были найдены решения с постоянными значениями $c_{p\rho\rho}$. Эти решения отличаются от полученного на 8-м шаге, которое наиболее приближено к точной зависимости $c_{p\rho\rho}$ от температуры, приведенной на рис. 2.

Таблица 3 – Результаты решения ОЗТ для ОЗП с переменными ТФХ, полученные с использованием точных данных по температуре образцов

№ шага	Порядок сплайн-аппроксимации и количество узловых точек	λ_p , Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹	$c_{p\rho\rho}$, МДж·м ⁻³ ·°C ⁻¹	F , °C
1	Нулевого порядка: λ и c_p – постоянные	0,589	1,211	28,99
2	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 2 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,416$ $\lambda_{1200} = 0,414$	2,339	4,78
3	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 3 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,605$ $\lambda_{600} = 0,897$ $\lambda_{1200} = 0,477$	2,418	2,96
4	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 4 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,583$ $\lambda_{400} = 1,145$ $\lambda_{800} = 0,722$ $\lambda_{1200} = 0,558$	2,427	2,43
5	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 2	$\lambda_{20} = 1,746$ $\lambda_{400} = 1,180$ $\lambda_{800} = 0,709$ $\lambda_{1200} = 0,532$	$c_{p20} = 2,639$ $c_{p1200} = 2,130$	2,28
6	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 3	$\lambda_{20} = 1,455$ $\lambda_{400} = 1,215$ $\lambda_{800} = 0,705$ $\lambda_{1200} = 0,537$	$c_{p20} = 1,203$ $c_{p100} = 2,699$ $c_{p1200} = 2,071$	1,52
7	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 4	$\lambda_{20} = 1,929$ $\lambda_{400} = 1,155$ $\lambda_{800} = 0,706$ $\lambda_{1200} = 0,557$	$c_{p20} = 1,204$ $c_{p100} = 3,792$ $c_{p200} = 2,393$ $c_{p1200} = 2,297$	1,08
8	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 5	$\lambda_{20} = 2,015$ $\lambda_{400} = 1,127$ $\lambda_{800} = 0,705$ $\lambda_{1200} = 0,574$	$c_{p20} = 2,009$ $c_{p100} = 2,602$ $c_{p115} = 4,592$ $c_{p200} = 2,258$ $c_{p1200} = 2,439$	0,72
9	Первого порядка λ и c_p – переменные количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 6	$\lambda_{20} = 2,013$ $\lambda_{400} = 1,128$ $\lambda_{800} = 0,705$ $\lambda_{1200} = 0,572$	$c_{p20} = 2,128$ $c_{p100} = 2,306$ $c_{p101} = 4,647$ $c_{p115} = 4,431$ $c_{p200} = 2,264$ $c_{p1200} = 2,430$	0,72

Таблица 4 – Результаты решения ОЗТ для ОЗП с переменными ТФХ, полученные с использованием возмущенных данных по температуре образцов

№ шага	Порядок сплайн-аппроксимации и количество узловых точек	λ_p , Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹	$c_p \rho_p$, МДж·м ⁻³ ·°C ⁻¹	F, °C
1	Нулевого порядка: λ и c_p – постоянные	0,591	1,219	36,25
2	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 2 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,431$ $\lambda_{1200} = 0,415$	2,378	21,89
3	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 3 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,635$ $\lambda_{600} = 0,903$ $\lambda_{1200} = 0,480$	2,449	21,56
4	Первого и нулевого порядка: λ – переменная, 4 узловые точки; c_p – постоянная	$\lambda_{20} = 1,586$ $\lambda_{400} = 1,172$ $\lambda_{800} = 0,720$ $\lambda_{1200} = 0,579$	2,467	21,46
5	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 2	$\lambda_{20} = 1,713$ $\lambda_{400} = 1,182$ $\lambda_{800} = 0,695$ $\lambda_{1200} = 0,549$	$c_{p20} = 2,607$ $c_{p1200} = 2,064$	21,44
6	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 3	$\lambda_{20} = 1,342$ $\lambda_{400} = 1,233$ $\lambda_{800} = 0,694$ $\lambda_{1200} = 0,549$	$c_{p20} = 0,805$ $c_{p100} = 2,737$ $c_{p1200} = 2,001$	21,34
7	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 4	$\lambda_{20} = 1,815$ $\lambda_{400} = 1,189$ $\lambda_{800} = 0,698$ $\lambda_{1200} = 0,569$	$c_{p20} = 1,096$ $c_{p100} = 3,661$ $c_{p200} = 2,468$ $c_{p1200} = 2,221$	21,31
8	Первого порядка: λ и c_p – переменные, количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 5	$\lambda_{20} = 1,929$ $\lambda_{400} = 1,165$ $\lambda_{800} = 0,697$ $\lambda_{1200} = 0,586$	$c_{p20} = 2,086$ $c_{p100} = 2,385$ $c_{p115} = 4,751$ $c_{p200} = 2,335$ $c_{p1200} = 2,361$	21,29
9	Первого порядка λ и c_p – переменные количество узловых точек: для λ – 4; для c_p – 6	$\lambda_{20} = 1,982$ $\lambda_{400} = 1,166$ $\lambda_{800} = 0,697$ $\lambda_{1200} = 0,584$	$c_{p20} = 2,166$ $c_{p100} = 2,240$ $c_{p101} = 3,371$ $c_{p115} = 4,675$ $c_{p200} = 2,343$ $c_{p1200} = 2,350$	21,29

Расчеты значений необходимой минимальной толщины $d_{pmin p}$ р ОЗП, которые обеспечивают нормативные пределы огнестойкости t_τ несущих металлических конструкций для заданных величин приведенной толщины профиля и критической температуры стали T_{cr} , были проведены для всех приведенных выше вариантов задания ТФХ огнезащитного покрытия, с использованием результатов решения ОЗТ. Эти расчетные значения сравнивали с точными значениями $d_{pmin T}$ и по формуле (6) рассчитывали соответствующие отклонения.

$$\delta_d = 100 (d_{pmin p} - d_{pmin T}) / d_{pmin T}. \quad (6)$$

В таблице 5 приведены значения такого отклонения для варианта с переменными ТФХ и возмущенными данными по температуре образцов, полученные с использованием результатов решения ОЗТ на 8-м шаге (табл. 4).

Таблица 5 – Отклонения расчетных от точных значений минимальной толщины огнезащитного покрытия

Предел огнестойкости t_{τ} , мин	30			120			240		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Критическая температура T_{cr} , °C									
Приведенная толщина V/A_p , м	Отклонение δ_d , %								
0,0025	-0,74	0,16	-0,85	-0,64	0,15	-0,30	-0,56	0,19	-0,10
0,005	-0,69	0,14	-0,81	-0,60	0,13	-0,26	-0,53	0,19	-0,06
0,0167	-0,43	0,10	-	-0,48	0,13	-0,05	-0,46	0,19	0,22

Из анализа приведенных в таблице 5 данных следует, что для рассматриваемого варианта решения отклонения δ_d имеют незначительные величины: от -0,85 % до 0,19 %. Такие же незначительные значения эти отклонения имеют и для решения ОЗТ на 4-м шаге: от -0,82 % до 1,13 %. При использовании результатов решения ОЗТ, полученных на 1-м шаге (поиск ТФХ, как констант), диапазон отклонения δ_d значительно больше и составляет от -28,24 % до 13,27 %. Аналогичная тенденция относительно отклонения δ_d имеет место и для варианта с переменными ТФХ и точными данными по температуре образцов. Для вариантов с постоянными ТФХ отклонения δ_d , рассчитанные с использованием результатов решения ОЗТ, полученным на каждом шаге (таблицы 1 и 2), имеют одинаковые значения.

Проведенный анализ полученных результатов показывает, что решения ОЗТ, для которых найденные значения ТФХ отличаются от точных и отклонение F имеет незначительную величину, также позволяют определять характеристику огнезащитной способности несущих металлических конструкций с достаточной точностью.

Из вышеизложенного следует, что предложенный алгоритм позволяет получать оптимальные решения как для огнезащитных покрытий, для которых ТФХ существенно зависят от температуры, так и для ОЗП с незначительно изменяющимися ТФХ.

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Предложен алгоритм решения ОЗТ для метода оценки огнезащитной способности ОЗП несущих стальных конструкций, основанного на решении уточненного уравнения теплопроводности, который приведен в ДСТУ Б В.1.1-17.

2. Результаты верификации предложенного алгоритма, проведенной методом вычислительного эксперимента, показали, что он позволяет получать оптимальные решения как для огнезащитных покрытий, для которых ТФХ существенно зависят от температуры, так и для ОЗП с незначительно изменяющимися ТФХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный стандарт Украины ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Защита от пожара. Огнезащитные покрытия для строительных несущих металлических конструкций. Метод определения огнезащитной способности (ENV 13381-4:2002, NEQ).

2. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло-массопереноса (общий инженерный подход). Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998, 224 С.

3. Европейский стандарт EN 1993-1-2:2005 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие положения. Расчет огнестойкости конструкций.