

УДК 621.01–66.05

АНДРЕЄВ І. А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Раціональне використання ресурсів при проектуванні технологічних трубопроводів та забезпечення їх зростаючих потреб вимагає виконання розрахунків на міцність, які потребують використання відповідних значень температурних коефіцієнтів сталей A_t . Метою статті є удосконалення знаходження температурних коефіцієнтів сталей, значення яких визначаються чинними в Україні нормативними документами.

В результаті встановлено, що залежність $A_t = f(t)$ для сталей Ст.3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С в діапазоні зміни t від 200 °С до 300 °С описується простою квадратичною регресією $A_t = -0,00001t^2 + 0,0025t + 0,9$, а при зміні t від 300 °С до 450 °С – кубічною регресією $A_t = -0,00000007t^3 + 0,00006696t^2 - 0,02197070t + 3,29876905$. У наведених формулах температура t підставлена в °С.

Залежність $A_t = f(t)$ для сталі 15Х5М в діапазоні зміни t від 200 °С до 390 °С можна описати квадратичною регресією $A_t = -0,00000794t^2 + 0,00336599t + 0,64421053$, а при зміні t від 390 °С до 450 °С – квадратичною регресією $A_t = -0,00007917t^2 + 0,06266667t - 11,64875000$.

Залежності $A_t = f(t)$ для інших сталей апроксимуються єдиними математичними рівняннями на всьому діапазоні змінювання температур.

Значення температурного коефіцієнта A_t для сталей 08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т описується кубічною регресією. $A_t = 0,00000002t^3 - 0,00001870t^2 + 0,00493000t + 0,61799999$.

Залежність $A_t = f(t)$ для сталей 12Х1МФ, 15Х1МФ описується квадратичною регресією $A_t = -0,00000128t^2 - 0,00016667t + 1,08461538$.

Значення температурного коефіцієнта A_t для сталі 20Х3МВФ описується квадратичною регресією $A_t = -0,00000453t^2 + 0,00182667t + 0,8160$.

Середнє значення похибки виконаних апроксимацій знаходиться в діапазоні від 0 % до 1,27 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з фактичними значеннями.

Використання запропонованих формул для розрахунку температурного коефіцієнта сталей дає змогу спростити розрахунок технологічних трубопроводів на міцність.

Ключові слова: сталій розвиток, трубопровід, міцність, розрахунок, температурний коефіцієнт

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2025.348827

Corresponding author: andreiev@ukr.net

Received 04 September 2025; Accepted 09 October 2025

Постановка проблеми. Інноваційні пропозиції в розрахунках на міцність технологічних трубопроводів мають на меті удосконалення стадії конструювання, забезпечення якісної освіти, що сприяє вирішенню проблем сталого розвитку. Нормативні документи на сталеві трубопроводи [1–5] містять характеристики міцності матеріалів при 20 °С. Отримання допустимих напружень при розрахунковій температурі $[\sigma]$ виконується відповідно будівельним нормам [6] перерахунком за формулою:

$$[\sigma] = [\sigma]_{20} A_t,$$

де $[\sigma]_{20}$ – допустиме напруження при температурі 20 °С, МПа; A_t – температурний коефіцієнт, який визначається за таблицею 1.

Величини A_t у будівельних нормах подаються залежно від температури t з кроком 10...150 °С. При цьому проміжні значення температурних коефіцієнтів A_t визначаються інтерполяцією, що потребує звертання до таблиць і ускладнює розробку комп'ютерних програм розрахунку. Тому виникає потреба у спрощені методики визначення температурних коефіцієнтів A_t , а конкретно – у використанні простих формул для розрахунку величин A_t без використання довідкових таблиць, що і реалізується у статті.

Таблиця 1 – Температурний коефіцієнт A_t

Марка сталі	$t_R, ^\circ\text{C}$	A_t
Ст.3, 10, 20, 25, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С	До 200	1,00
	250	0,90
	300	0,75
	350	0,66
	400	0,52
	420	0,45
	430	0,38
	440	0,33
	450	0,28
15Х5М	До 200	1,00
	325	0,90
	390	0,75
	430	0,66
	450	0,52
08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т	До 200	1,00
	300	0,90
	400	0,75
	450	0,69
12Х1МФ, 15Х1МФ	До 200	1,00
	320	0,90
	450	0,75
20Х3МВФ	До 200	1,00
	350	0,90
	450	0,72

Аналіз попередніх досліджень. Автори посібників з розрахунку технологічних трубопроводів використовують стандартні методики знаходження значень температурних коефіцієнтів A_t шляхом інтерполяції табличних величин [7, 8]. Останнім часом в опублікованих наукових працях була запропонована заміна табличних значень величин рівняннями регресії при визначенні модуля поздовжньої пружності сталей і при розрахунку трубної решітки кожухотрубного теплообмінника [9, 10]. Невирішеною частиною наукової проблеми є апроксимування залежності нормативних значень температурних коефіцієнтів A_t від температури t простими рівняннями, які б були зручними як для інженерних розрахунків, так і для розробки комп'ютерних програм.

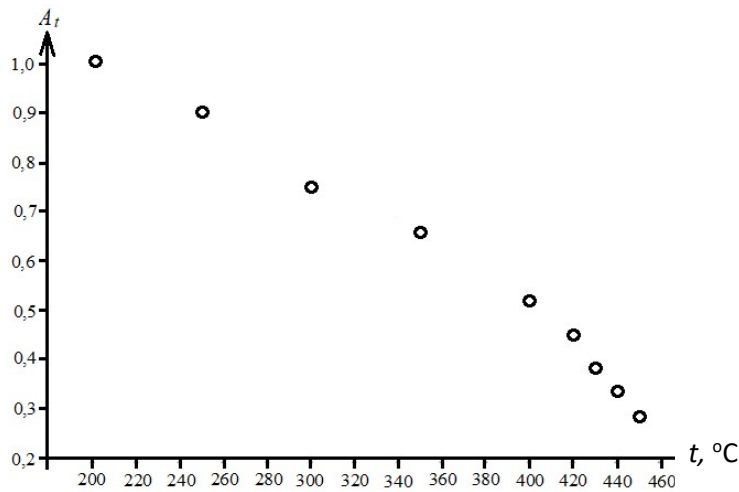
Метою статті є опис залежностей значень температурних коефіцієнтів A_t від температури t простими математичними рівняннями з середньою похибкою апроксимації не більше 1,5 %.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано для сталей трубопроводів апроксимувати залежності коефіцієнтів A_t від температури t нескладними рівняннями. Для сталей Ст.3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С було побудовано точковий графік $A_t = f(t)$ (рис. 1) за даними табл. 1.

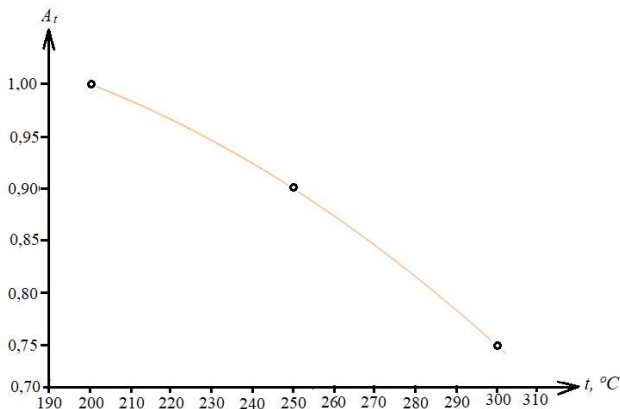
Для більш точного опису залежності $A_t = f(t)$ математичним рівнянням розглянемо окремо 2 ділянки: 1 – в діапазоні змінювання t від 200 °С до 300 °С (рис. 2) і 2 – в діапазоні змінювання t від 300 °С до 450 °С (рис. 3).

В результаті було запропоновано застосувати для опису залежності $A_t = f(t)$ в діапазоні змінювання t від 200 °С до 300 °С квадратичну регресію $A_t = -0,00001t^2 + 0,0025t + 0,9$ (повністю відповідає нормативним значенням), а при змінюванні t від 300 °С до 450 °С – кубічну регресію $A_t = -0,00000007t^3 + 0,00006696t^2 - 0,02197070t + 3,29876905$ (середня похибка апроксимації дорівнює 1,27 %).

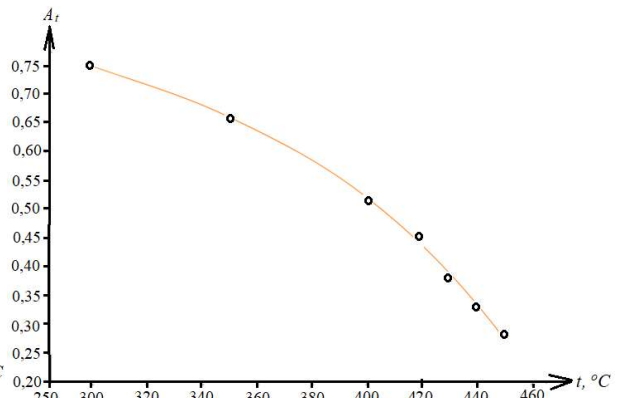
Аналогічно проаналізуємо залежність $A_t = f(t)$ для сталі 15Х5М. Точковий графік цієї залежності за даними таблиці 1 наведено на рисунку 4.



**Рис. 1 – Точковий графік залежності $A_t = f(t)$
для сталей Ст. 3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С**



**Рис. 2 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталей Ст. 3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С
в діапазоні змінювання t від 200 °С до 300 °С**



**Рис. 3 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталей Ст. 3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С
в діапазоні змінювання t від 300 °С до 450 °С**

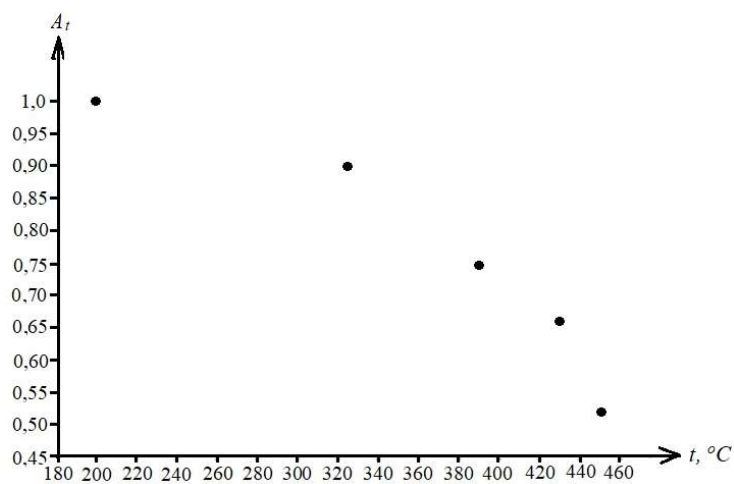


Рис. 4 – Точковий графік залежності $A_t = f(t)$ для сталі 15X5M

Проведений аналіз точкового графіку (рис. 4) дозволив запропонувати для опису змінювання температурного коефіцієнту A_t від температури t для сталі 15X5M такі ділянки: першу – в діапазоні змінювання температури t від 200 °C до 390 °C включно (рис. 5), другу – в діапазоні змінювання t від 390 °C до 450 °C включно (рис. 6).

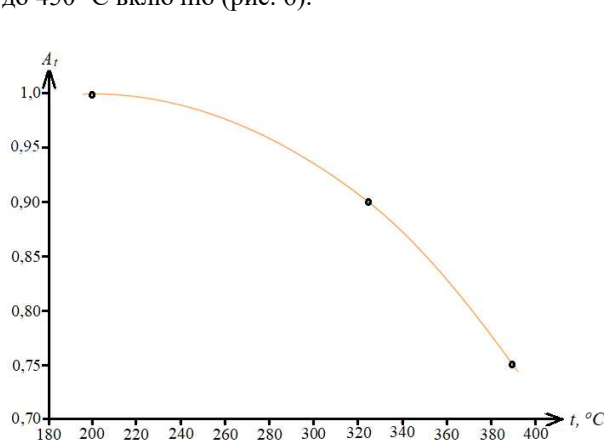


Рис. 5 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталі 15X5M в діапазоні змінювання t від 200 °C до 390 °C

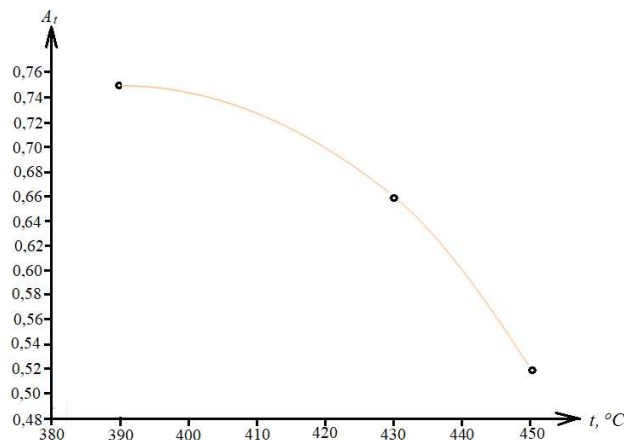


Рис. 6 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталі 15X5M в діапазоні змінювання t від 390 °C до 450 °C

Запропоновано залежність $A_t = f(t)$ для сталі 15X5M в діапазоні змінювання t від 200 °C до 390 °C описати квадратичною регресією $A_t = -0,00000794t^2 + 0,00336599t + 0,64421053$ (повний збіг з нормативними значеннями), а при змінюванні t від 390 °C до 450 °C – квадратичною регресією $A_t = -0,00007917t^2 + 0,06266667t - 11,64875000$ (середня похибка апроксимації дорівнює 0,00000001 %).

Залежності $A_t = f(t)$ для інших сталей апроксимуються єдиними математичними рівняннями на всьому діапазоні змінювання температур. Точками на графіках позначені нормативні величини температурних коефіцієнтів з таблиці 1.

Для сталей 08X18H10T, 08X22H6T, 12X18H12T, 12X18H10T, 45X14H14B2M, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T крива залежності $A_t = f(t)$ (рис. 7) описується кубічною регресією $A_t = 0,00000002t^3 - 0,00001870t^2 + 0,00493000t + 0,61799999$ (середня похибка апроксимації дорівнює 0,00000104 %).

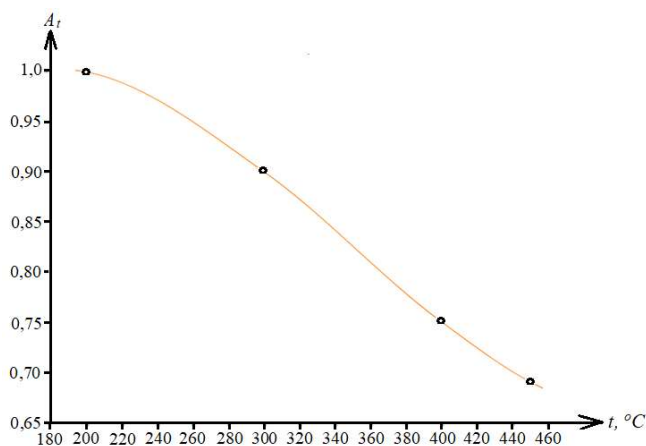


Рис. 7 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталей 08X18H10T, 08X22H6T, 12X18H12T, 12X18H10T, 45X14H14B2M, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T

Для сталей 12X1MФ, 15X1MФ крива залежності $A_t = f(t)$ (рис. 8) описується квадратичною регресією $A_t = -0,00000128t^2 - 0,00016667t + 1,08461538$ (повний збіг з нормативними значеннями).

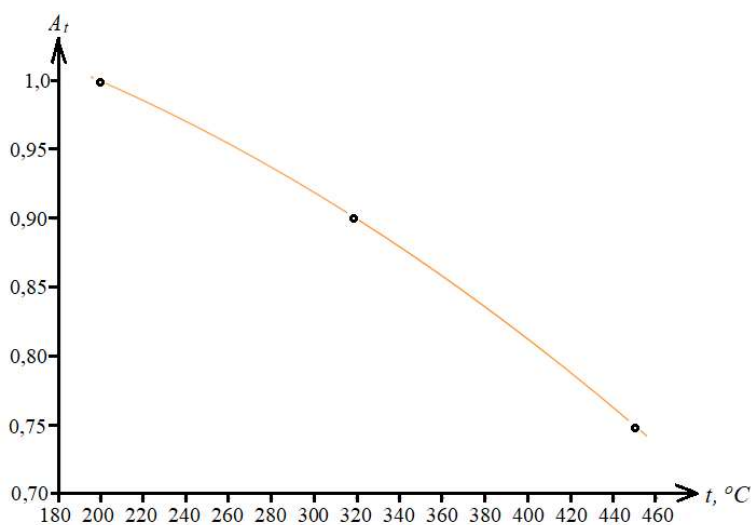


Рис. 8 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталей 12X1МФ, 15X1МФ

Для сталі 20Х3МВФ крива залежності $A_t = f(t)$ (рис. 9) описується квадратичною регресією $A_t = -0,00000453t^2 + 0,00182667t + 0,8160$ (повний збіг з нормативними значеннями).

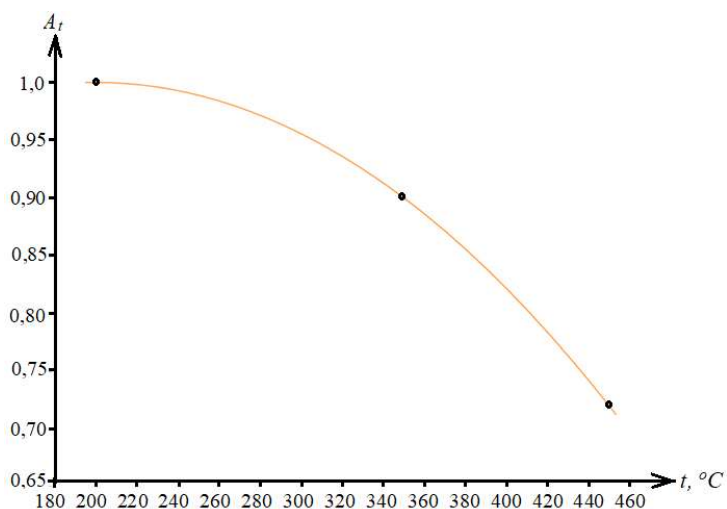


Рис. 9 – Залежність $A_t = f(t)$ для сталі 20Х3МВФ

Висновки. Отримані формули для розрахунку значень температурних коефіцієнтів A_t , які використовуються для визначення допустимих напружень сталей елементів трубопроводів при розрахунковій температурі. Максимальне значення похибки апроксимації при цьому дорівнює 1,27 %, що свідчить про високий рівень збігу рівнянь регресії з нормативними величинами. Використання наведеного удосконалення сприяє спрощенню розрахунку технологічних трубопроводів на міцність.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується продовжити роботу з удосконалення розрахунків на міцність і стійкість елементів посудин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 9218:2023 Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови. [Чинний від 2023–07–01]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102743.

2. ДСТУ 8934:2019 Труби безшовні гарячедеформовані з корозійнотривких сталей. Технічні умови. [Чинний від 2021–01–01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. III, 15 с.
 3. ДСТУ 8937:2019 Труби безшовні холодно- та теплодеформовані з корозійнотривких сталей і сплавів. Технічні умови. [Чинний від 2021–01–01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. III, 18 с.
 4. ДСТУ 8938:2019 Труби сталеві безшовні гарячедеформовані. Технічні умови. [Чинний від 2021–01–01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. III, 20 с.
 5. ДСТУ 8939:2019 Труби сталеві безшовні холоднодеформовані. Технічні умови. [Чинний від 2021–01–01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. III, 18 с.
 6. СН 527-80. Інструкція по проектуванню технологічних сталевих трубопроводів Ру до 10 МПа. URL: <https://budinfo.org.ua/doc/1807926/SN-527-80-Instruktsiia-po-proektuvanniu-tekhnologichnikh-stalevikh-truboprovodiv-Ru-do-10-MPa>.
 7. Штонда Ю. Н., Іванченко В. В., Табунщиков В. Г. Проектування та розрахунок технологічних трубопроводів: Методичний посібник до організації вивчення дисципліни. Сєверодонецьк: Видавництво Сєверодонецького технологічного інституту ШУ імені Володимира Даля, 2009. 40 с.
 8. Андреев Ігор. Розрахунок технологічних трубопроводів: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52475>.
 9. Андреев І. А. Розрахунок модулю пружності сталей під час розтягу. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. Київ, 2024. № 1 (23). С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300978>.
 10. Андреев І. А. Удосконалення розрахунку трубної решітки кожухотрубного теплообмінного апарата на міцність. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. Київ, 2023. № 2 (22). С. 9–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2023>.
-

Igor Andreiev

IMPROVEMENT OF CALCULATION OF TECHNOLOGICAL PIPELINES

Rational use of resources in the design of technological pipelines and ensuring their growing needs requires the performance of strength calculations, which require the use of appropriate values of temperature coefficients of steels A_t . The purpose of the article is to improve the determination of temperature coefficients of steels, the values of which are standardized by regulatory documents in force in Ukraine. Based on typical tables, dot plots of changes in temperature coefficients of steels A_t from which technological pipelines are made depending on the temperature t have been constructed and analyzed. It is proposed to approximate these dependencies by simple mathematical equations.

As a result, it was established that the dependence $A_t = f(t)$ for steels Cm.3, 10, 20, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С in the range of t change from 200 °C to 300 °C is described by a simple quadratic regression $A_t = -0,00001t^2 + 0,0025t + 0,9$, and when t changes from 300 °C to 450 °C – by a cubic regression $A_t = -0,00000007t^3 + 0,00006696t^2 - 0,02197070t + 3,29876905$. In the above and proposed formulas, the temperature t is substituted in °C.

The dependence $A_t = f(t)$ for steel 15Х5М in the range of t change from 200 °C to 390 °C can be described by the quadratic regression $A_t = -0,00000794t^2 + 0,00336599t + 0,64421053$, and when t changes from 390 °C to 450 °C – by the quadratic regression $A_t = -0,00007917t^2 + 0,06266667t - 11,64875000$.

The dependencies $A_t = f(t)$ for other steels are approximated by single mathematical equations over the entire range of temperature changes.

The value of the temperature coefficient A_t for steels 08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т is described by cubic regression $A_t = 0,00000002t^3 - 0,00001870t^2 + 0,00493000t + 0,61799999$.

The dependence $A_t = f(t)$ for steels 12Х1МФ, 15Х1МФ is described by quadratic regression $A_t = -0,00000128t^2 - 0,00016667t + 1,08461538$.

The value of the temperature coefficient A_t for steel 20Х3МБФ is described by quadratic regression $A_t = -0,00000453t^2 + 0,00182667t + 0,8160$.

The obtained formulas allow to abandon the use of standard tables and additional interpolation of intermediate values of temperature coefficients of steels when performing calculations, which in turn simplifies both the calculation itself and the development of appropriate computer programs.

The average error value of the performed approximations is in the range from 0% to 1.27%, which indicates a high level of coincidence of the regression equations with the actual values.

The use of the proposed formulas for calculating the temperature coefficient of steels makes it possible to simplify the calculation of technological pipelines for strength.

In the future, it is planned to continue work on improving calculations for the strength and stability of elements of vessels and apparatus in chemical and oil refining industries.

Keywords: sustainable development, pipeline, strength, calculation, temperature coefficient

References

1. DSTU 9218:2023 (2023). Truby stalevi zvarni priamoshovni. Tekhnichni umovy [Straight-seam welded steel pipes. Technical conditions]. [Effective from 2023-07-01], Kyiv. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102743
2. DSTU 8934:2019 (2020). Truby bezshovni hariachedeformovani z korozijnotryvkykh stalej. Tekhnichni umovy [Seamless hot-deformed pipes made of corrosion-resistant steels. Technical conditions]. [Effective from 2021-01-01], Kyiv.
3. DSTU 8937:2019 (2020). Truby bezshovni kholodno- ta teplodeformovani z korozijnotryvkykh stalej i splaviv. Tekhnichni umovy [Seamless cold- and hot-deformed pipes made of corrosion-resistant steels and alloys. Technical conditions]. [Effective from 2021-01-01], Kyiv.
4. DSTU 8938:2019 (2020). Truby stalevi bezshovni hariachedeformovani. Tekhnichni umovy [Seamless hot-deformed steel pipes. Technical conditions]. [Effective from 2021-01-01], Kyiv.
5. DSTU 8939:2019 (2020). Truby stalevi bezshovni kholodnodeformovani. Tekhnichni umovy [Seamless cold-formed steel pipes. Technical conditions]. [Effective from 2021-01-01], Kyiv.
6. SN 527-80 (2023). Instruktsiia po proektuvanniu tekhnolohichnykh stalevykh truboprovodiv Ru do 10 MPa [Instructions for designing technological steel pipelines Ru up to 10 MPa], Kyiv. URL: <https://budinfo.org.ua/doc/1807926/SN-527-80-Instruktsiia-po-proektuvanniu-tekhnologichnykh-stalevykh-truboprovodiv-Ru-do-10-MPa>.
7. Shtonda Yu. N., Ivanchenko V. V. and Tabunskykh V. H. (2009). Proektuvannia ta rozrakhunok tekhnolohichnykh truboprovodiv: Metodychnyj poradnyk do orhanizatsii vyvchennia dystsypliny [Design and calculation of technological pipelines: Methodological guide to organizing the study of the discipline], Severodonetsk.
8. Andreiev Ihor (2023). Rozrakhunok tekhnolohichnykh truboprovodiv: navch. posib. dlia stud. spetsial'nosti 133 «Haluzeve mashynobuduvannia» [Calculation of technological pipelines: a manual for students of specialty 133 "Industrial mechanical engineering"], Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52475>.
9. Andreiev I. A. (2024), Rozrakhunok moduliu pruzhnosti stalej pid chas roztyahu [Calculation of the modulus of elasticity of steels during tension], Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikors'koho», seriia „Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia”, no 1 (23), pp. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300978>.
10. Andreiev I. A. (2023), Udoskonalennia rozrakhunku trubnoi reshitky kozhukhotrubnoho teploobminnoho aparata na mitsnist' [Improvement of the strength calculation of the tube grid of a shell-and-tube heat exchanger], Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikors'koho», seriia „Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia”. no 2 (22), pp. 9–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2023>.