

Снурніков Д.В., аспірант, Красніков І.Л., к.техн.н., доцент,  
Бабіченко А.К., к.техн.н., доцент

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** система централізованого теплопостачання, водогрійний котел, математична модель, комп'ютерно-інтегрована технологія

### Вступ

Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є перспективним та ефективним способом забезпечення тепловою енергією населення та інших споживачів в країнах із перехідною економікою та європейських країнах. Загалом у країнах ЄС частка СЦТ становить 13 % і планується доведення її частки до 50 % до 2050 року [1].

В Україні за останні десятиріччя рівень централізованого теплопостачання скоротився, але при цьому остається одним із найвищих у Європі [2]. При цьому, існуючі на сьогоднішній день в Україні СЦТ значною мірою вичерпали свій ресурс роботи та не відповідають сучасним вимогам та тенденціям. Однією із таких типових для великих міст України є система централізованого теплопостачання Роганського житлового масиву міста Харкова.

Системи централізованого теплопостачання працюють в умовах постійної зміни теплового навантаження, що пов'язано як з нестаціонарністю параметрів об'єкта керування так із невизначеністю зовнішніх збурень, основні з яких обумовлені кліматичними умовами та змінною структурою споживаного теплового навантаження [3]. За таких обставин, як відомо [4,5], забезпечення необхідного режиму теплопостачання найбільш ефективно може бути реалізовано із застосуванням комп'ютерно-інтегрованих технологій, що вимагає проведення досліджень, аналізу СЦТ як об'єкта керування та розробки математичної моделі одного з найважливіших її складових – водогрійного котла.

### Мета досліджень

Створення математичної моделі водогрійного котла СЦТ великого міста, як основної складової технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що забезпечує можливість прийняття рішень щодо визначення необхідного режиму теплопостачання в умовах існуючих невизначеностей.

### Аналіз об'єкту та методика проведення досліджень

Об'єктом дослідження є СЦТ Роганського житлового масиву м. Харкова. Вона є складною ієрархічною структурою та включає дві районні котельні, магістральні теплові мережі, центральні теплові пункти на групі будівель, внутрішньоквартальні розподільні теплові мережі, індивідуальні теплові пункти та системи опалення з опалюва-

льними приладами споживачів теплової енергії. Основна тепла енергія виробляється в водотрубних парових котлах ДКВР-20-13 та водогрійних газових котлах КВГ-6,5-150.

Котел є інерційним, багатопараметричним об'єктом керування з розподіленими параметрами. Вибір структури математичної моделі котла залежить від поставлених завдань моделювання. Математична модель котла як об'єкта керування повинна бути якнайбільше адекватна характеристикам промислової установки. Для синтезу комп'ютерної технології управління такими складними об'єктами доцільно використати статистичні моделі у вигляді лінійних поліномів [6].

Дослідження роботи водогрійного котла проводилось за даними пасивного експерименту. Для відсіювання неякісних експериментальних даних розраховувалися середньоквадратичне відхилення результату вимірювань і абсолютне значення відхилення поточного параметра від його середнього значення  $\bar{x}_i$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2}{N}}, \quad (1)$$

де  $x_i$  – поточне значення параметра;  $\bar{x}_i$  – середнє значення параметра;  $N$  – кількість вимірів у вибірці.

Усі експериментальні дані, значення яких перевищувало вираз  $\sigma > 3\bar{x}_i$ , виключалися з розгляду. Дані, що залишилися, відповідали нормальному закону розподілу з ймовірністю не менше 95 % [7].

Перевірка гіпотези щодо нормальності розподілів експериментальних даних здійснювалася за критерієм Колмогорова-Смирнова, який використовує порівняння двох емпіричних функцій розподілу [8].

За результатами експериментальних даних розраховували накопичені частоти  $P_0(x)$  і очікувані накопичені частоти  $S(x)$  для нормального розподілу, потім вибиралося максимальне значення  $P_0(x)-S(x)$ , за допомогою якого і визначався критерій згоди Колмогорова-Смирнова  $D$ . Отримане значення порівнювалося з критичним, взятим із таблиць [9]. Результати зазначеного порівняння дозволили зробити висновок, що з ймовірністю 95 % можна прийняти гіпотезу про нормальний розподіл основних змінних об'єкту, що розглядається.

На основі наявних апріорних даних про об'єкт була прийнята математична модель у вигляді лінійного полінома наступного виду [10].

$$y^P = b_0 + b_1x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2)$$

де  $y^P$  – залежна (вихідна)змінна;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – незалежні змінні (фактори);  $b_0$  – вільний член рівняння;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – коефіцієнти регресії;  $n$  – кількість незалежних змінних.

Оцінювання параметрів лінійної регресії (2) проводилось методом найменших квадратів (МНК), який дозволяє отримати такі оцінки параметрів  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ , при



Умова МНК у матричній формі записується так

$$F = (Y - XB)^T (Y - XB) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Диференціюючи функцію (6) по матриці  $B$  і прирівнюючи перші частинні похідні по  $B$  до нуля отримуємо наступне рівняння

$$\frac{\partial F}{\partial B} = -2X^T Y + 2X^T YXB = 0. \quad (7)$$

Звідси отримуємо формулу для знаходження матриці параметрів моделі виду (2).

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (8)$$

де  $X^T$  – транспонована матриця;  $(X^T X)^{-1}$  – зворотна матриця.

Для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії використовується  $t$ -критерій Стьюдента. З табличним значенням порівнюється відношення значення коефіцієнта  $b_i$  та його випадкової помилки  $m_{bi}$

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{m_{bi}}. \quad (9)$$

Випадкові помилки параметрів лінійної регресії визначаються за формулою

$$m_{bi} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N (y_u - y^p)^2 / (N - 2)}{\sum_{u=1}^N (x_{ui} - \bar{x}_i)^2}}, \quad (10)$$

де  $y_u, x_{ui}$  – експериментальні дані;  $y^p$  – розрахункові дані;  $\bar{x}_i$  – середні дані.

Практична значущість рівняння множинної регресії оцінюється за допомогою коефіцієнту детермінації  $R^2$ , який характеризує тісноту лінійного кореляційного зв'язку між однією випадковою величиною  $y$  та деякою множиною випадкових величин  $x_i$ . Коефіцієнт детермінації показує частку дисперсії результативної ознаки  $y$ , яка пояснюється регресією, у загальній дисперсії результативної ознаки [12].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - y^p)^2}{\sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y})^2}. \quad (11)$$

Якість рівняння множинної регресії в цілому оцінюється за допомогою  $F$ -критерію Фішера. При відсутності паралельних дослідів розрахувати дисперсію відтворності (досвіду) неможливо. Тому замість перевірки адекватності проводиться оцінка якості апроксимації дослідних точок прийнятим рівнянням регресії, тобто перевіряється, чи має сенс це рівняння. Така перевірка досягається порівнянням залишкової дисперсії  $D_{\text{ЗАЛ}}^2$  та дисперсії відносно середнього  $D_y^2$ , які розраховуються за формулами [12].

$$D_{\text{ЗАЛ}}^2 = \frac{1}{f} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_u^p)^2 ; \quad (12)$$

$$D_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y})^2 . \quad (13)$$

Рівняння регресії має сенс, якщо дисперсії відносно середнього  $D_y^2$  суттєво більше ніж залишкова дисперсія  $D_{\text{ЗАЛ}}^2$ . Критерій Фішера в даному випадку має вид такого відношення

$$F = \frac{D_y^2}{D_{\text{ЗАЛ}}^2} . \quad (14)$$

Рівняння регресії має сенс за наступної умови

$$F > F_{T(f_1, f_2)} , \quad (15)$$

де  $F_T$  – значення критерія Фішера, яке знаходять по таблицям розподілення Фішера для рівнів вільності  $f_1 = N - 1$  і  $f_2 = N - n - 1$  при заданому рівні значущості.

### Результати досліджень

В результаті проведеного пасивного експерименту на котельній установці Роганського житломасиву м. Харкова було отримано масиви експериментальних даних погодинної роботи котла КВГ-6,5-150 у кількості 215 вимірювань. Для визначення статистичних характеристик можна обмежитися обробкою однієї реалізації на досить великому інтервалі часу замість проведення багатьох експериментів [12]. Експериментальні дані вважаємо ергодичними.

Для котла КВГ-6,5-150 були отримані експериментальні дані за такими параметрами:

Вхідні параметри (фактори):

$x_1$  – температура зовнішнього повітря, °С;

$x_2$  – температура теплоносія перед котлом, °С;

$x_3$  – витрата теплоносія в котел, м<sup>3</sup>/год;

$x_4$  – витрата природного газу, м<sup>3</sup>/год;

Вихідний (залежний параметр)  
 $y$  – температура теплоносія після котла, °С.

Основні статистичні дані та результати їх обробки наведені в табл.1.

В результаті обробки даних пасивного експерименту за МНК згідно наведеної вище методики отримуємо лінійну багатопараметричну регресійну математичну модель для керованої вихідної змінної котла

$$y^P = 73,16 + 0,814x_1 + 0,736x_2 - 0,109x_3 + 0,026x_4.$$

Результати оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії та параметри якості отриманого рівняння наведені в табл.2

Таблиця 1 – Основні параметри експериментальних даних

Показники режимів роботи котла	Температура зовнішнього повітря $x_1$ , °С	Температура теплоносія перед котлом $x_2$ , °С	Витрата теплоносія в котел $x_3$ , м <sup>3</sup> /год	Витрата природного газу $x_4$ , м <sup>3</sup> /год	Температура теплоносія після котла $y$ , °С
Верхній	0,5	83	82	710	130
Нижній	-16	63	65	600	108
Статистичні показники					
Дисперсія	17.99	12.15	23.509	1520	54.77
Математичне очікування	-6.615	60.67	69	659.47	121.1

Таблиця 2 – Значення критеріїв Стьюдента, Фішера і коефіцієнта детермінації

Умовна позначка параметра	$t$ -критерій Стьюдента розрахунковий	$t$ -критерій Стьюдента табличний	Коефіцієнт детермінації	Критерій Фішера розрахунковий	Критерій Фішера табличний
$x_1$	6,39	1,972	0,9558	24,7	1,14
$x_2$	4,754				
$x_3$	2,651				
$x_4$	2,841				

Як можна побачити із даних наведених в табл. 2 розрахункові значення  $t$ -критеріїв Стьюдента перевищують табличне значення. Тобто гіпотезу про несуттєвість коефіцієнтів регресії можна відхилити та усі коефіцієнти є значущими.

### Висновки

Таким чином, за результатами проведеного пасивного експерименту на водогрійному котлі, що входить до складу СЦТ великого міста, отримане рівня математич-

ної моделі, що пов'язує основний показник роботи котла (температуру теплоносія на виході) з факторами, які змінюються в процесі його нормальної експлуатації.

Перевірка отриманого рівняння регресії показала, що значення критерія детермінації  $R^2=0,9558$  перевищує допустиме значення 0,8, а фактичне значення критерію Фішера значно перевищує табличне значення. Отже можна зробити висновок, що зв'язок між змінними в регресійному рівнянні суттєвий і отримане рівняння можна використовувати для практичних розрахунків при синтезі технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

### Література

1. Derii V.O. Trends in the development of the district heating systems of Ukraine. The problems of general energy, 2021, 1(64): 52–59 doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.052>.
2. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелев, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін. ; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої // Пред-во Фонду ім. Г. Бюлля в Україні.– Київ : Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017.– 88 с.
3. Serafeim Moustakidis, Ioannis Meintanis, George Halikias, Nicos Karcanias, 2019. An Innovative Control Framework for District Heating Systems: Conceptualisation and Preliminary Results, Resources, 8(1), 27; <https://doi.org/10.3390/resources8010027>.
4. Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty / Babichenko A., Babichenko J., Kravchenko Y., Velma S., Krasnikov I., Lysachenko I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 2 (91). P. 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.
5. Никифоров А.С. Приходько Е.В., Кинжибекова А.К. Энергосбережение при эксплуатации теплогенерирующих установок: монография. – Павлодар: Кереку, 2015.– 187 с.
6. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография / А. А. Бобух, Д. А. Ковалёв; Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ, 2013. – 226 с.
7. Основи наукових досліджень: навч. посіб. / А.К. Бабіченко, М.О. Подустов, В.І. Вельма, Ю.А. Бабіченко, Я.О. Кравченко, І.Л. Красніков; за ред. А.К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», НФаУ, 2021. – 133 с.
8. Бідюк П. І. Ймовірно-статистичні методи моделювання і прогнозування : монографія / П. І. Бідюк, О. П. Гожий. – Миколаїв : Чорноморський державний університет ім. Петра Могили, 2014. – 440 с.
9. Сиденко В. М. Основы научных исследований / В. М. Сиденко, И. М. Грушко. – Х. : Вища школа, 1978. – 200 с.
10. Кобильник Т.П. Методичні аспекти навчання множинного лінійного регресійного аналізу з використанням статистичного середовища R. Фізико-математична освіта. 2018. Випуск 1(15). С. 57–62.
11. Літнарівич Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник, МЕГУ, Рівне, 2011.–140 с.

12. Бондарь, А.Г. Математическое моделирование в химической технологии : Учеб. / А.Г. Бондарь.– К. : Вища шк., 1973. – 280 с.

Bibliography (transliterated)

1. Derii V.O. Trends in the development of the district heating systems of Ukraine. The problems of general energy, 2021, 1(64): 52–59 doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.052>.
2. Perehid Ukrainy na vidnovliuvanu enerhetyku do 2050 roku / O. Diachuk, M. Chepeliev, R. Podolets, H. Trypolska ta in. ; za zah. red. Yu. Oharenko ta O. Aliievoi // Pred-vo Fondu im. H. Bolla v Ukraini. – Kyiv : Vyd-vo TOV «ART KNYHA», 2017. – 88 p.
3. Serafeim Moustakidis, Ioannis Meintanis, George Halikias, Nicos Karcanias, 2019. An Innovative Control Framework for District Heating Systems: Conceptualisation and Preliminary Results, Resources, 8(1), 27; <https://doi.org/10.3390/resources8010027>.
4. Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty / Babichenko A., Babichenko J., Kravchenko Y., Velma S., Krasnikov I., Lysachenko I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 2 (91). P. 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.
5. Nykyforov A.S. Prykhodko E.V., Kynzhybekova A.K. Enerhosberezhnye pry ekspluatatsyy teploheneryuiushchykh ustanovok: monohrafiya. – Pavlodar: Kereku, 2015. – 187 p.
6. Kompiuterno-yntehyrovannaia systema avtomatyzatsyy tekhnolohycheskykh ob'ektov upravleniia tseentralyzovannym teplosnabzhenyem: monohrafiya / A. A. Bobukh, D. A. Koval'ev; Khark. nats. un-t hor. khoz-va ym. A. N. Beketova. – Kh. : KhNUHKh, 2013. – 226 p.
7. Osnovy naukovykh doslidzhen: navch. posib. / A.K. Babichenko, M.O. Podustov, V.I. Velma, Yu.A. Babichenko, Ya.O. Kravchenko, I.L. Krasnikov; za red. A.K. Babichenka. – Kh.: NTU «KhPI», NFaU, 2021. – 133 p.
8. Bidiuk P. I. Ymovirnisno-statystychni metody modeliuвання i prohnozuvannya : monohrafiia / P. I. Bidiuk, O. P. Hozhyi. – Mykolaiv : Chornomorskyi derzhavnyi universytet im. Petra Mohyly, 2014. – 440 p.
9. Sidenko V. M. Osnovy nauchnykh issledovaniy / V. M. Sidenko, I. M. Grushko. – H. : Vischa shkola, 1978. – 200 p.
10. Kobylnyk T.P. Metodychni aspekty navchannya mnozhynnoho liniinoho rehresiinoho analizu z vykorystanniam statystychnoho seredovyscha R. Fyzyko-matematychna osvita. 2018. Vypusk 1(15). P. 57–62.
11. Litnarovych R.M. Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu. Navchalnyi posibnyk, MEHU, Rivne, 2011.– 140 p.
12. Bondar, A.G. Matematicheskoe modelirovanie v himicheskoy tehnologii : Ucheb. / A.G. Bondar. — K. : Vischa shk., 1973. – 280 p.



УДК 621.182

Снурніков Д.В., аспірант, Красніков І.Л., к.техн.н., доцент,  
Бабіченко А.К., к.техн.н., доцент

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Проведено аналіз умов функціонування типової системи централізованого теплопостачання великого міста, зокрема водогрійного газового котла. Показано, що котел, як основний об'єкт керування, працює в умовах постійної зміни зовнішнього теплового навантаження, що обумовлює внаслідок їх випадкового характеру дії низку невизначеностей. Обґрунтована доцільність математичного опису невизначеностей з використанням стохастичного методу, як найбільш апробованого в практичних умовах.

За результатами проведеного пасивного експерименту на водогрійному газовому котлі КВГ-6,5-150 системи централізованого теплопостачання одного з районів м. Харкова був отриманий масив погодинних експериментальних даних, що відображають основні показники роботи водогрійного котла. В результаті обробки даних методом найменших квадратів отримана математична модель котла у вигляді лінійного рівняння регресії, яке відображає зв'язок температури теплоносія на виході котла із температурою навколишнього повітря, температурою теплоносія на вході в котел і з витратами природного газу і теплоносія в котел.

Виконана перевірка отриманого рівняння регресії за статистичним критерієм Стьюдента, яка підтвердила значущість усіх коефіцієнтів регресійної моделі.

Проведена оцінка щодо практичної значущості рівняння множинної регресії за допомогою коефіцієнту детермінації. Якість рівняння множинної регресії в цілому оцінювалась за допомогою  $F$ -критерію Фішера. Так як паралельні опити не проводились, то замість перевірки адекватності проводилась оцінка якості апроксимації дослідних точок прийнятим рівнянням регресії, тобто перевірялось, чи має сенс це рівняння. Така перевірка проводилась порівнянням залишкової дисперсії та дисперсії відносно середнього.

Результати розрахунків показали, що значення критерія детермінації значно перевищує допустиме значення, а фактичне значення критерію Фішера суттєво перевищує табличне. Отримані показники дозволили зробити висновок, що зв'язок між змінними в регресійній моделі суттєвий, а запропонований стохастичний метод та отримане рівняння множинної лінійної регресії можна використовувати для прийняття рішень в процесі синтезу технічної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування об'єктами централізованої системи теплопостачання.

**Ключові слова:** система централізованого теплопостачання, водогрійний котел, математична модель, комп'ютерно-інтегрована технологія.

Снурников Д.В., аспирант, Красников И.Л., к.техн.н., доцент,  
Бабиченко А.К., к.техн.н., доцент

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА СИСТЕМЫ  
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ  
КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

Проведен анализ условий функционирования типовой системы централизованного теплоснабжения большого города, в частности, водогрейного газового котла. Показано, что котел как основной объект управления работает в условиях постоянной смены внешней тепловой нагрузки, что приводит вследствие их случайного характера к возникновению ряда неопределенностей. Обоснована целесообразность математического описания неопределенностей с использованием стохастического метода как наиболее апробированного в практических условиях.

По результатам проведенного пассивного эксперимента на водогрейном газовом котле КВГ-6,5-150 системы централизованного теплоснабжения одного из районов Харькова был получен массив почасовых экспериментальных данных, отражающих основные показатели работы водогрейного котла. В результате обработки данных методом наименьших квадратов получена математическая модель котла в виде линейного уравнения регрессии, отражающего связь температуры теплоносителя на выходе котла с температурой окружающего воздуха, температурой теплоносителя на входе в котел и с расходами природного газа и теплоносителя в котел.

Выполнена проверка полученного уравнения регрессии по статистическому критерию Стьюдента, подтвердившая значимость всех коэффициентов регрессионной модели.

Проведена оценка практической значимости уравнения множественной регрессии с помощью коэффициента детерминации. Качество уравнения множественной регрессии в целом оценивалось с помощью  $F$ -критерия Фишера. Так как параллельные опросы не проводились, то вместо проверки адекватности проводилась оценка качества аппроксимации опытных точек принятым уравнением регрессии, то есть проверялось, имеет ли смысл это уравнение. Такая проверка проводилась сравнением остаточной дисперсии и дисперсией относительно среднего.

Результаты расчетов показали, что значение критерия детерминации значительно превышает допустимое значение, а фактическое значение критерия Фишера существенно превышает табличное. Полученные показатели позволили сделать вывод, что связь между переменными в регрессионной модели существенна, а предложенный стохастический метод и полученное уравнение множественной линейной регрессии можно использовать для принятия решений в процессе синтеза технической структуры компьютерно-интегрированной системы управления объектами централизованной системы теплоснабжения.

**Ключевые слова:** система централизованного теплоснабжения, водогрейный котел, математическая модель, компьютерно-интегрированная технология.

Snurnykov D.V, Krasnikov I.L., Babichenko A.K.

## STUDY OF A DISTRICT HEATING SYSTEM WATER BOILER AS A OBJECT OF CONTROL

The analysis of the operating conditions of a typical district heating system, in particular, a hot water gas boiler, was carried out. It is shown that the boiler, as the main control object, operates under conditions of constant change in external heat load, which, due to their random nature, leads to a number of uncertainties. The expediency of the mathematical description of uncertainties using the stochastic method as the most tested in practical conditions is substantiated.

According to the results of the passive experiment on the hot water gas boiler KVG-6.5-150 of the district heating system of one of the districts of Kharkov, an array of hourly experimental data was obtained, reflecting the main performance indicators of the hot water boiler. As a result of data processing by the least squares method, a mathematical model of the boiler was obtained in the form of a linear regression equation, reflecting the relationship between the temperature of the coolant at the boiler outlet and the ambient air temperature, the temperature of the coolant at the inlet to the boiler and with the flow rates of natural gas and coolant to the boiler.

The obtained regression equation was verified by Student's t-test, which confirmed the significance of all coefficients of the regression model.

The practical significance of the multiple regression equation was assessed using the coefficient of determination. The quality of the multiple regression equation as a whole was assessed using Fisher's F-test. Since parallel surveys were not conducted, instead of checking the adequacy, the quality of the approximation of the experimental points by the accepted regression equation was assessed, that is, it was checked whether this equation makes sense. Such a test was carried out by comparing the residual variance and the variance relative to the mean.

The calculation results showed that the value of the coefficient of determination significantly exceeds the allowable value, and the actual value of the Fisher criterion significantly exceeds the table value. The obtained indicators led to the conclusion that the relationship between the variables in the regression model is significant, and the proposed stochastic method and the multiple linear regression equation can be used to make decisions in the process of synthesizing the technical structure of a computer-integrated control system for objects of a district heating system.

**Keywords:** district heating system, hot water boiler, mathematical model, computer-integrated technology