

УДК 621.0+621.365.5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСШИРЕНИЙ МАТЕРИАЛА НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ**

©Черкашина О. С., Трищ Г. М.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

**Черкашина Ольга Сергіївна:** ORCID: 0000-0002-5564-5100; старший викладач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Трищ Галина Михайлівна:** ORCID: 0000-0002-0012-4689; trich@ukr.net; кандидат технічних наук; докторант кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статье представлены экспериментальные исследования влияния температуры нагрева в зоне контакта сопрягаемой поверхности деталей при скреплении многоэлементного соединения. В основу исследований вошло определение правомерности предложенного усовершенствованного нормативного обеспечения расчета сборочных размерных цепей для получения многоэлементного соединения с заданными параметрами в условиях термовоздействия.

В работе выполнен расчет сборочной размерной цепи многоэлементного соединения вероятностным способом без учета влияния температурных расширений материала и с учетом влияния температурных расширений материала. Представлены результаты величины замыкающего звена с учетом влияния температурных расширений материала при выполнении сборочных операций ротора питательного насоса в условиях термовоздействия.

**Ключевые слова:** точность сборки; линейное расширение; температурный зазор; размерная цепь; замыкающее звено; многоэлементное соединение.

**Черкашина О.С., Трищ Г.М.** «Дослідження впливу температурних розширень матеріалу на якість з'єднання виробу в умовах термовпливу».

У статті представлено експериментальні дослідження впливу температури нагріву в зоні контакту поверхні деталей при скріпленні багатоелементного з'єднання. В основу досліджень увійшло визначення правомірності запропонованого вдосконаленого нормативного забезпечення розрахунку складальних розмірних ланцюгів для отримання багатоелементного з'єднання із заданими параметрами в умовах термовпливу.

В роботі виконано розрахунок складального розмірного ланцюга багатоелементного з'єднання імовірнісним способом без урахування впливу температурних розширень матеріалу і з урахуванням впливу температурних розширень матеріалу. Представлені результати величини замикаючої ланки з урахуванням впливу температурних розширень матеріалу при виконанні складальних операцій ротора питомого насоса в умовах термовпливу.

**Ключові слова:** точність складання; лінійне розширення; температурний зазор; розмірний ланцюг; замикаюча ланка; багатоелементне з'єднання.

**Cherkashina O., Trishch G.** “Investigation of the effect temperature expansion of the material on the quality of the joint product under conditions of thermal exposure”.

The article presents experimental studies of the influence of the heating temperature in the contact zone of the mating surface of parts when fastening a multielement joint. The research was

based on the definition of the legitimacy of the proposed improved regulatory support for the calculation of assembly dimensional chains for obtaining a multielement connection with specified parameters under thermal exposure conditions.

In this paper, the assembly dimension chain of a multielement connection was calculated using a probabilistic method without taking into account the influence of thermal expansions of the material and taking into account the effect of thermal expansion of the material. The results of the value of the closing link are presented, taking into account the effect of temperature expansion of the material when performing the assembly operations of the rotor of the feed pump under thermal exposure conditions.

**Key words:** accuracy of assembly; linear expansion; temperature gap; dimensional chain; closing link; multi-element connection.

### **1. Введение**

В машиностроении качество работы машин и механизмов в значительной степени зависит от качества изготовления отдельных деталей и процесса их сборки, особенно это актуально для изделий из многоэлементная соединением. Одним из прогрессивных методов сборки является метод с термовоздействием, который применяют в ответственных изделиях и конструкциях с высокими требованиями к прочности и точности соединения.

Качество процесса сборки закладывается на этапе технологической подготовки производства и базируется на разработке соответствующей конструкторской и технологической документации, при разработке которой обязательным является расчет размерных цепей, обеспечивает соразмерную точность сборочной единицы. Для этого должны быть установлены единые требования, нормы и правила расчета размерных цепей в зависимости от точности и надежности конструкции в соответствующих нормативных документах.

### **2. Анализ исследований**

Как показали исследования, существующие межгосударственные, национальные, отраслевые нормативные документы регламентируют порядок, правила расчета размерных цепей при условии, что посадочный диаметр детали типа «втулка» гарантировано больше от посадочного диаметра типа «вал». Предлагаемая методика расчета применима только для одномерных размерных цепей, на что указывалось в [1, 2, 3, 4, 5], без учета определенных методов сборки. Но в случае сборки с термовоздействием в многоэлементном соединении между деталями после их охлаждения в осевом направлении появляются температурные зазоры, что приводит к нарушению размерной цепи сборочной единицы, а в некоторых случаях к невозможности процесса сборки. В работе [6], рассмотрены вопросы усовершенствования нормативной базы расчета сборочных размерных цепей с учетом температурных зазоров, возникающих в процессе сборки в условиях термовоздействия.

### **3. Задачи исследований**

Задачей исследований является определение правомерности предложенного усовершенствованного нормативного обеспечения расчета сборочных размерных цепей для получения многоэлементного соединения с заданными параметрами в условиях термовоздействия и определения правомерности теоретически полученных результатов путем сравнения их с независимыми исследовательскими данными.

Исследования, представленные в статье, проводились на образцах и натуральных изделиях: вал и колеса ротора питательного насоса типа СВПТ-340-1000 ЛМЗ.

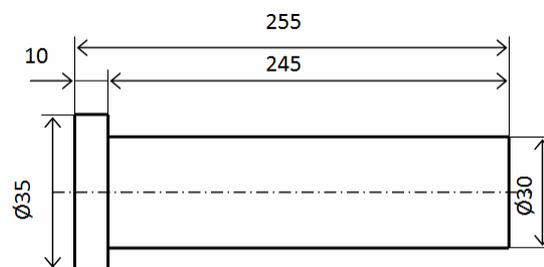
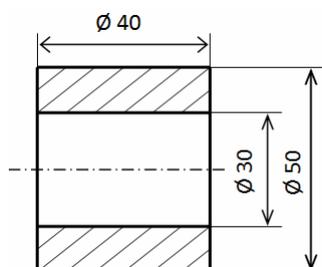
Методика экспериментальных исследований предусматривала:

- 1) расчет сборочной размерной цепи многоэлементного соединения вероятностным способом без учета влияния температурных расширений материала;
- 2) расчет сборочной размерной цепи многоэлементного соединения вероятностным способом с учетом влияния температурных расширений материала;
- 3) выбор материалов, конструкции узлов;
- 4) подготовка образцов и оборудования к экспериментам;
- 5) определение величины замыкающего звена после сборки ротора питательного насоса без учета влияния температурных расширений материала;
- 6) определение величины замыкающего звена после сборки ротора питательного насоса с учетом влияния температурных расширений материала.

#### 4. Конструкция исследуемых узлов

При выборе материалов образцов исходили из требования, что они должны быть наиболее распространены в промышленности, по конструкции и размерам соответствовать минимальным затратам на изготовление и отвечать поставленным задачам исследования.

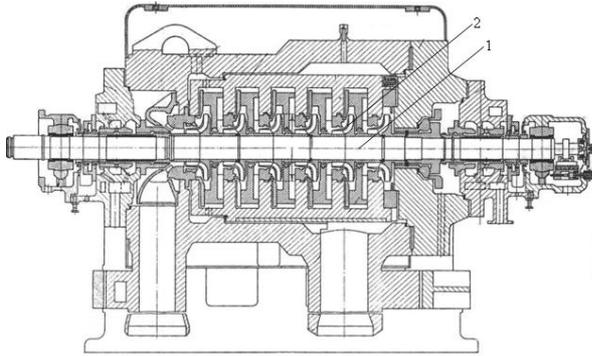
Общий вид исследуемых деталей представлен на рисунках 1 и 2.



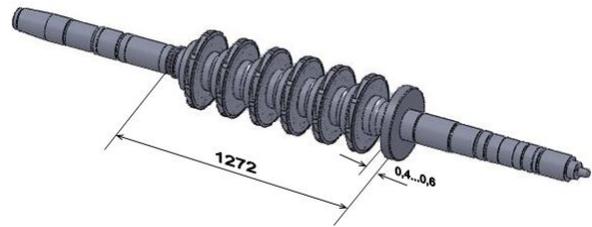
**Рис. 1** – Общий вид исследуемого образца «штулка»    **Рис. 2** – Общий вид исследуемого образца «вал»

Контролируемым размером является расстояние между торцами втулок при сборке с помощью нагрева. Для того, что бы провести исследования процесса рассеяния размеров, необходимо провести не менее 80 испытаний.

Натурными образцами являлись вал и колеса ротора питательного насоса типа СВПТ-340-1000 ЛМЗ (рис. 3). Насосы такого типа относятся к числу наиболее ответственных вспомогательных машин тепловых электрических станций. Особые условия работы насоса требуют, чтобы все детали ротора, наряду с надежным закреплением их против воздействия рабочей среды, имели бы еще и возможность свободного теплового расширения. Для этого необходимо точно выдерживать осевые размеры. Ротор представляет собой многоэлементное соединение, состоящий из вала 1 последовательно насаженных на него шесть рабочих колес 2 с нержавеющей стали. Посадка колес на вал осуществляется с натягом. Общий вид ротора в сборе приведен на рисунке 4.



**Рис. 3** – Общий вид питательного насоса типа СВПТ-340-1000 ЛМЗ: 1 – вал ротора; 2 – колесо ротора

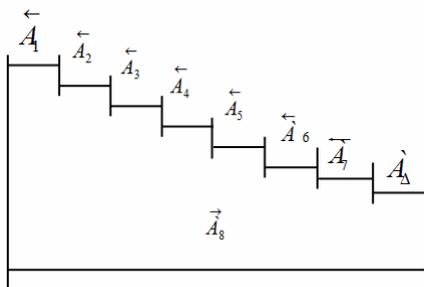


**Рис. 4** – Ротор питательного насоса

Все детали крупногабаритные – внутренний диаметр колеса ротора составляет 164,8 мм; ширина посадочной поверхности колеса ротора – 195 мм; суммарная длина вала – 3465 мм. Диаметр посадочной поверхности по длине вала составляет – 1272 мм. Материал колес – сталь 45Х ГОСТ 8479-70; вала – сталь 35ХГСА по ГОСТ 8479-70.

Сборка ротора осуществляется с помощью индукционного нагрева, что обусловлено рядом преимуществ: возможность программировать параметры нагрева изделия; исключение перегрева лопаток до опасных температур, приводящих к разупрочнению материала; получение сопрягаемой поверхности без царапин и деформаций; повышение производительности труда. Недостатками такой сборки является выдерживание размерной точности за счет линейных расширений материалов вследствие воздействия температуры.

**Расчет сборочной размерной цепи.** Расчет сборочной размерной цепи предусматривает получение зазора между торцами колеса и ступицы разгрузочного диска определенного размера. Для этого на основании чертежа «Ротор. Сборочный чертеж ПН 1500-350» была построена схема размерной единицы (рис. 5). Размер  $A_1$  – составляющее уменьшающее звено, равный расстоянию между торцом первого колеса и торцом ступени вала; размеры  $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$  – составляющие уменьшающие звенья сборочной размерной цепи, которые имеют значение длины посадочной поверхности колес;  $A_8$  – составляющее увеличивающее звено, имеет значение общей длины между торцами первого колеса и разгрузочного диска;  $A_1$  – замыкающее звено, которое имеет значения расстояния между торцами последнего колеса ротора и разгрузочного диска.



**Рис. 5** – Схема размерной цепи сборочной единицы

Так как производство по изготовлению роторов является мелкосерийным, и количество звеньев размерной цепи превышает четырех, решение поставленной задачи реализовали способом вероятностного суммирования.

Выполнили решение прямой задачи. Из служебного назначения механизма следует, что минимальный зазор между торцом последнего колеса ротора и торцом разгрузочного диска должен составлять 0,4 мм; а максимальный 0,6мм. Следовательно, поле допуска на зазор будет равен:

$$\delta_{\Delta} = \Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}} = 0,6 - 0,4 = 0,2 \text{ мм.}$$

Координата середины поля допуска замыкающего звена:

$$\Delta_{O_{\Delta}} = (\Delta_{B_{\Delta}} + \Delta_{H_{\Delta}}) / 2 = (0,6 + 0,4) / 2 = 0,5 \text{ мм.}$$

Решение прямой задачи сводим в таблицу 3,4.

Для составляющих звеньев в графу 1 (табл. 1) занесли номер составляющего звена; в графу 2 (табл. 1) – его характер; в графу 3 (табл. 1) – номинальный размер. В графу 4 (табл. 1) внесли значения квадратов единиц допусков всех составляющих звеньев, исходя из заданного номинального размера каждого звена.

В графе 5 (табл. 1) определили количество единиц допуска по формуле

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} i_i^2}}, \quad (1)$$

где  $i_i$  - единица допуска  $i$ -го составляющего звена.

Квалитет всех звеньев размерной цепи, кроме одного по выбору (в данном случае оставили звено  $A_8$ ), определили по величине  $a$  и записали в графу 6 (табл. 1).

Далее значения допусков размеров составляющих звеньев, кроме одного определили по ГОСТ 24643-81 исходя из величины номинального размера (графа 3, табл. 1) и квалитета (графа 6, табл. 1) и внесли в графы 3 и 4 (табл. 2). Половину поля допуска замыкающего звена и составляющих звеньев определили по формулам:

$$\frac{\delta_{\Delta}}{2} = \frac{\Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}}}{2}, \quad \frac{\delta_i}{2} = \frac{\Delta_{B_i} - \Delta_{H_i}}{2}.$$

Полученные данные занесли в графу 9, возвели в квадрат и записали в графу 6 (табл. 2). Половину поля допуска оставшегося составляющего звена определили по выражению:

$$\frac{\delta_x}{2} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta}}{2}\right)^2 - \sum_{i=1}^{(m-1)-1} \left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 \xi^2},$$

где  $\xi$  – передаточное отношение, которое в зависимости от вида размерной цепи может иметь различное содержание и значение. Так, в данном случае для линейной цепи для увеличивающих составляющих звеньев передаточное отношение равняется единицы, для уменьшающих составляющих звеньев передаточное отношение равняется минус единица.

Затем определили координаты середин полей допусков всех составляющих звеньев, кроме одного

$$\Delta_{O_i} = (\Delta_{B_i} + \Delta_{H_i}).$$

Полученные значения записали в графу 7 (табл.2), где в конце просуммировали отдельные координаты середин полей допусков увеличивающих  $\Delta_{O_{ai}}$  и уменьшающих  $\Delta_{O_{ai}}$  звеньев.

Координату середины поля допуска оставшегося составляющего звена определили по выражению

$$\Delta_{O_x} = \left( \Delta_{O_{\Delta}} + \sum_{i=1}^{m-1} \Delta_{O_{ai}} \right) - \sum_{i=1}^{(m-1)-1} \Delta_{O_{ai}}.$$

## Технологія машинобудування

Таблица 1 – Расчет размерной цепи сборочной единицы

№ Звена	Характеристика звена	Номинальный размер, мм	Единица допуска в квадрате	Количество единиц допуска в квадрате	Квалитет
1	2	3	4	5	6
-	Замыкающее				
1	Уменьшающее	102	4,709	26,9	8
2	Уменьшающее	195	8,410		8
3	Уменьшающее	195	8,410		8
4	Уменьшающее	195	8,410		8
5	Уменьшающее	195	8,410		8
6	Уменьшающее	195	8,410		8
7	Уменьшающее	195	8,410		8
8	Увеличивающее	1272			
	Итого:		55,169		

Таблица 2 – Расчет размерной цепи сборочной единицы

№ Звена	Характеристика звена	Предельные отклонения, мкм		Половина поля допуска, мкм	Половина поля допуска в квадрате, мкм	Координата середины поля допуска, мкм
		верхнее	нижнее			
1	2	3	4	5	6	7
-	Замыкающее	600	400	100	10000	500
1	Уменьшающее	54	0	27	729	27
2	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
3	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
4	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
5	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
6	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
7	Уменьшающее	72	0	36	1296	36
8	Увеличивающее	782	704	38,67	1495	743

Предельные отклонения оставшегося составляющего звена определили как

$$\Delta_{B_x} = \Delta_{O_x} + 0,5\delta_x, \quad \Delta_{B_x} = \Delta_{O_x} - 0,5\delta_x$$

и записали в оставшиеся графы.

Выполнили решение обратной задачи. Для этого определили номинальное значение замыкающего звена без учета линейного расширения материала и его предельные отклонения.

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \xi_{A_i} A_i = -102 + (-195) \cdot 6 + 1272 = -1272 + 1272 = 0.$$

$$\Delta_{O_{\Delta}} = \left( \sum_1^m \Delta_{B_i} - \sum_1^n \Delta_{H_i} \right) \pm K_i \sqrt{\sum_1^{m+n} \left( \frac{T_i}{2} \right)^2},$$

$$\Delta_{B_{\Delta}} = (743 - 243) + 100 = 600 \text{ мкм},$$

$$\Delta_{H_{\Delta}} = (743 - 243) - 100 = 400 \text{ мкм}.$$

Далее для определения точности сборки нашли коэффициент риска и значение процента риска

$$t = \frac{0,5T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_1^{m+n} \lambda_i^2 \left( \frac{T_i}{2} \right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{81 + 864 + 166}} = \frac{100}{33,3} \approx 3.$$

В данном случае для  $t=3$ , процент риска составляет 0,27 процента. Следовательно, допуски составляющих звеньев находятся в пределах экономической точности, сборка будет выполняться с полной взаимозаменяемостью.

Теоретический расчет выполнен верно, т.к. решая обратную задачу, номинальное значение равняется 0, а величина зазора находится от 0,4 мм до 0,6 мм.

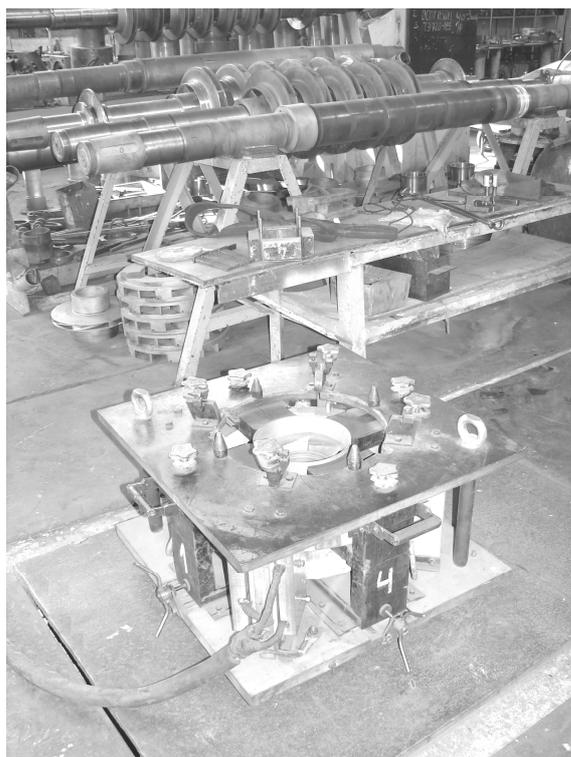
Определяем номинальное значение замыкающего звена размерной цепи с учетом линейного расширения материала.

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n (\xi_{A_i} A_i - (\beta_{B_{Ti}} l_i T_{B_{Ti}} + \Delta_{o_i})) = -102 + (-192,9) \cdot 6 + 1272 = -1259,4 + 1272 = 12,6 \text{ мм.}$$

Полученное значение замыкающего звена не соответствует требованиям поставленной задачи.

Следующим этапом является выполнение сборки ротора питательного насоса и определение величины зазора между торцами последнего колеса и разгрузочного диска в производственных условиях с помощью дополнительных технологических операций и без них.

В производственных условиях была осуществлена сборка ротора питательного насоса рисунки 6 и 7.



**Рис. 6** – Индуктор для нагрева колес



**Рис. 7** – Соединение вал-колесо

При температуре  $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , было нагрето шесть колес ротора, которые последовательно соединялись валом. Время охлаждения каждого колеса составило около 4 часов при условии, что температура воздуха составляла  $15\text{-}19\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше нуля.

Экспериментальное определение величины замыкающего звена после сборки ротора питательного насоса без учета влияния температурных расширений материала показало, что последнее колесо вышло за границы посадочной поверхности вала. При выполнении сборки

**Технологія машинобудування**

---

с учетом влияния температурных расширений, полученный в расчете размер 12,6 мм компенсировался при сборке колес по всей поверхности вала, что дало возможности получить заданный размер замыкающего звена между торцами шестого колеса и диска. Зазоры, которые были получены между колесами, допустимы и имеют значение величин температурных зазоров, полученных в теоретической части работы.

**Выводы**

Экспериментальные исследования по определению величины замыкающего звена при расчеты сборочных размерных цепей с учетом влияния температурных зазоров показали, что результат расчета номинального значения замыкающего звена не соответствует поставленной задачи по сравнению с полученными результатами при расчете без учета влияния температурных зазоров. Однако практическое выполнении сборки ротора питательного насоса типа СВПТ-340-1000 ЛМЗ с учетом влияния температурных зазоров, дает возможность повысилась точность сборки в осевом направлении на 5-13% и уменьшить величину зазора между торцами колеса ротора и разгрузочного диска на 6-10% без использования дополнительного технологического оборудования и операций.

**Список использованных источников:**

1. Размерный анализ технологических процессов / В. В. Матвеев, М. М. Тверской, Ф. И. Бойков и др. – М. : Машиностроение, – 1982. – 264 с.
2. ГОСТ 16319-80. Термины, обозначения и определения размерных цепей. – Введ. с 01.01.81. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 32 с.
3. ГОСТ 16320-80. Методы расчета конструкторских, технологических и измерительных плоских размерных цепей. – Введ. с 01.01.81. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 29 с.
4. ГОСТ 19415-74. Цепи размерные. Методы расчета коэффициентов относительной асимметрии и относительного рассеяния замыкающего звена. – Введ. с 01.01.75. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 26 с.
5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – Введ. с 01.01.77. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 35 с.
6. Черкашина О. С. Стандартизация расчета сборочных размерных цепей в машиностроении в условиях термовоздействия / О. С. Черкашина, О. А. Мельниченко, А. Р. Трищ / *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2016. – № 18. – С. 120-126.

**References**

1. Matveev, V, Tverskoy, M & Boykov, F 1982, *Razmernyy analiz tekhnologicheskikh protsessov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1981, *Terminy, oboznacheniya i opredeleniya razmernykh tsepey*, GOST 16319-80, Izdatelstvo standartov, Moskva.
3. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1990, *Metody rascheta konstruktorskiykh, tekhnologicheskikh i izmeritelnykh ploskiykh razmernykh tsepey*, GOST 16320-80, Izdatelstvo standartov, Moskva.
4. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1974, *Tsepi razmernyye. Metody rascheta koeffitsientov odnositelnoy asimmetrii i odnositelnogo rasseyaniya zamykayushchego zvena*, GOST 19415-74, Izdatelstvo standartov, Moskva.
5. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1976, *Bazirovaniye i bazy v mashinostroyenii. Terminy i opredeleniya*, GOST 21495-76, Izdatelstvo standartov, Moskva.
6. Cherkashina, O, Mel'nichenko, O & Trishch, R 2016, 'Standartizatsiya rascheta sborochnykh razmernykh tsepey v mashinostroyenii v usloviyakh termovozdeystviya', *Mashinobuduvannia*, iss 18, pp. 120-126.

Стаття надійшла до редакції 19 квітня 2018 р.