

DOI 10.32820/2079-1747-2018-22-135-141

УДК 621.757

**ТЕПЛОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ СБОРКЕ
КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЛОКОМОТИВОВ С ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЕМ**

©Малицький І. Ф., Смирнов І. П.

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

Малицький Ігор Федорович: ORCID: 0000-0003-0026-2791; malickiy1925@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри метало ріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Смирнов Ігор Петрович: ORCID: 0000-0002-5982-8123; smirnov_ip@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У машинобудуванні застосовується ряд малоефективних технологічних процесів пов'язаних зі складанням нерухомих з'єднань з гарантованим натягом. При складанні методом запресовування виникають пошкодження контактуючих поверхонь. При цьому натяг зменшується за рахунок того, що зминання і стирання поверхонь контакту при запресовуванні. Складання з нагріванням деталей, що охоплює, відбувається без пошкодження контактних поверхонь і дійсний натяг відповідає розрахунковому.

У процесі досліджень були визначені оптимальні величини температури і часу нагрівання охоплюючих деталей колісної пари локомотивів, які забезпечують величину складального зазору, достатнього для вільного складання. З огляду на специфіку номенклатури деталей колісних пар, були сформульовані основні технічні вимоги до промислових індукційно-нагрівальним установкам для нагріву цих деталей.

На підставі цих вимог були спроектовані, виготовлені і впроваджені у виробництво індукційно-нагрівальні установки для здійснення нагріву під складання елементів колісної пари локомотивів. Це дозволило підвищити надійність і міцність з'єднань в 2,5 рази, підвищити продуктивність праці, поліпшити культуру виробництва, зменшити зайнятість площ цеху. Економічний ефект тільки для одного локомотиворемонтного заводу склав 3,9 млн. гривень.

Ключові слова: колісна пара, формування колісних пар, посадка з натягом, індукційно-теплова збірка, складальний зазор, швидкість нагріву, час нагрівання.

Малицький І.Ф., Смирнов І.П. «Теплодинамические характеристики при сборке колесной пары локомотивов с термовоздействием».

В машиностроении применяется ряд малоэффективных технологических процессов связанных со сборкой неподвижных соединений с гарантированным натягом. При сборке методом запрессовки возникают повреждения контактирующих поверхностей. При этом натяг уменьшается за счет смятия и истирания поверхностей контакта при запрессовке. Сборка с нагревом охватываемой детали происходит без повреждения контактных поверхностей и действительный натяг соответствует расчетному.

В процессе исследований были определены оптимальные величины температуры и времени нагрева охватываемых деталей колесной пары локомотивов, при которых обеспечивалась величина сборочного зазора, достаточного для свободной сборки. Учитывая специ-

фику номенклатуры охватывающих деталей колесных пар, были сформулированы основные технические требования к промышленным индукционно-нагревательным установкам для нагрева этих деталей.

На основании этих требований были спроектированы, изготовлены и внедрены в производство индукционно-нагревательные установки для осуществления нагрева под сборку элементов колесной пары локомотивов. Это позволило повысить надежность и прочность соединений в 2,5 раза, повысить производительность труда, улучшить культуру производства, уменьшить занятость площадей цеха. Экономический эффект только для одного локомотиворемонтного завода составил 3,9 млн. гривен.

Ключевые слова: колесная пара, формирование колесных пар, посадка с натягом, индукционно-тепловая сборка, сборочный зазор, скорость нагрева, время нагрева.

Malickiy I., Smirnov I. «Thermodynamic characteristics when assembling the wheel pair of locomotives with thermal action».

In mechanical engineering, a number of inefficient technological processes are used associated with the assembly of motionless joints with guaranteed tension. When assembling pressing method, damage to the contacting surfaces occurs. In this case, the tension is reduced due to collapsing and erasing the contact surfaces during pressing.

The assembling with heating of the female part occurs without damage to the contact surfaces and the actual tension corresponds to the calculated one.

In the course of the research, the optimal values of temperature and heating time were determined for the parts of the wheel pair of locomotives, at which the size of the assembly clearance, sufficient for free assembly, was provided. Taking into account the specifics of the range of covering parts for wheel pair, the main technical requirements for industrial induction heating systems for heating these parts were formulated.

On the basis of these requirements, induction heating installations were designed, manufactured and introduced into for the implementation of warming for assembling elements of the wheel pair of locomotives. This made it possible to increase the reliability and durability of the joints by 2.5 times, to increase labor productivity, to improve the production culture, to reduce the occupancy of the workshop areas. The economic effect for only one locomotive repair plant amounted to 3.9 million UAN.

Keywords: wheel pair, the formation of wheel pairs, landing with tension, induction-thermal assembly, assembly gap, heating rate, heating time.

1. Постановка проблемы

В машиностроении и особенно в ремонтном производстве имеет место ряд малоэффективных технологических процессов связанных со сборкой неподвижных соединений с гарантированным натягом. Например, при сборке деталей таких соединений колесной пары локомотивов применяются мощные и громоздкие прессы [1]. А так как от прочности и надежности неподвижного соединения колесной пары локомотива и ее элементов зависит безопасность движения состава, то сборка методом запрессовки не дает полной гарантии качеству соединения.

2. Анализ последних исследований

При сборке методом запрессовки возникают задиры и другие повреждения контактирующих поверхностей, которые могут привести к взаимному смещению соединяемых эле-

ментов, что, в свою очередь, приводит к аварии. Контроль прочности соединения необъективно оценивается по натягу, который теряет свою величину, так как измеренный перед сборкой размер уменьшается за счет смятия и стирания поверхностей контакта при запрессовке. Сборка с нагревом охватывающей детали происходит без повреждения контактных поверхностей и действительный натяг соответствует расчетному. Вследствие этого прочность сопряжения при сборке с термовоздействием более чем в 2,5 раза выше, чем прочность соединения, полученного запрессовкой [2, 3].

Цель статьи - определить теплодинамические характеристики при сборке с термовоздействием колесной пары локомотивов и сформулировать основные технические требования к промышленным индукционно-нагревательным установкам для нагрева этих деталей.

3. Основной материал

В Украинской инженерно-педагогической академии был спроектирован и внедрен в производство ряд высокоэффективных установок для сборки и разборки отдельных элементов колесной пары с использованием индукционного нагрева токами промышленной частоты [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Индукционные нагревательные установки под сборку и разборку деталей типа «втулка» обеспечивают локальный нагрев охватывающих элементов колесной пары до температуры 250-300 °С, что обеспечивает увеличение диаметра охватывающей детали на величину, необходимую для свободной насадки детали на вал или свободного съема с вала. Номенклатура нагреваемых элементов колесной пары приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Номенклатура нагреваемых элементов колесной пары

| № п/п | Наименование детали | № детали по чертежу | Масса детали, кг | Допустимая температура нагрева, С° |
|-------|------------------------------|---------------------|------------------|------------------------------------|
| 1 | Втулка | ДП 47.31.12.00 | 8,5 | 200 |
| 2 | Втулка | ДП 47.31.17.00 | 9,85 | 180 |
| 3 | Кольцо лабиринтное | 316.80.10.100 | 6,2 | 150 |
| 4 | Кольцо | ДП36.01.05P01/02 | 2,1 | 150 |
| 5 | Шестерня ведущая | 302.30.10.338 | 37,5 | 250 |
| 6 | Шестерня ведомая | 302.30.10.339 | 40,5 | 250 |
| 7 | Коническая шестерня малая | Д 100.08.004-1 | 22 | 250 |
| 8 | Корпус буксы | ДП 36.31.01.01 | 38 | 200 |
| 9 | Корпус буксы | 116.30.10.144 | 85 | 250 |
| 10 | Корпус буксы с осевым упором | ДП 47.31.11 | 58 | 230 |

Исследование индукционного нагрева охватывающих деталей проводилось с предварительной подготовкой деталей, подлежащих сборке с гарантированным натягом. Для определения теплодинамических условий нагрева охватывающей детали они были оснащены термопарами для контроля температуры нагрева. Температура нагрева детали измерялась в характерных точках ТП1, ТП2 и ТП3 (рис. 1) посадочной поверхности системой потенциометр-термопара.

Кроме этого производился обмер геометрических размеров деталей по внутреннему диаметру охватывающей детали перед нагревом и после нагрева, а также по наружному диаметру охватываемой детали - оси колесной пары. Обмеры охватывающих деталей и оси проводились в двух сечениях А и В, отстоящих от торца детали на 10 мм и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях I и II (рис. 2).

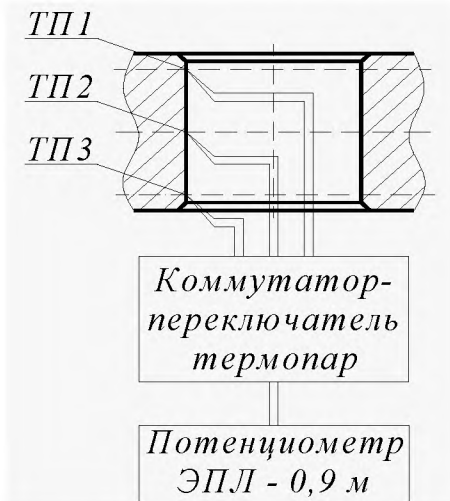


Рис. 1 - Схема замера температуры

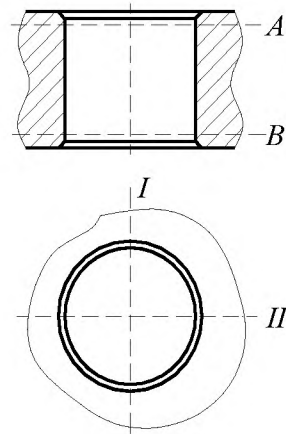


Рис. 2 - Схема замеров охватываемой детали

Данные измерений сводились в таблицу 2 (приведены для втулки ДП 47.31.12.00), после чего определялось увеличение внутреннего диаметра при различных температурах нагрева. В результате определялась оптимальная температура нагрева детали, которая обеспечивала требуемую величину сборочного зазора, необходимого для свободной сборки оси с охватываемой деталью. Электрические параметры индуктора и электросети также приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Данные измерений при нагреве втулки ДП 47.31.12.00

| Время нагрева, мин | Температура в точках термодпар, С° | | | Параметры сети | | | | | Параметры индуктора | |
|-----------------------|------------------------------------|-----|-----|----------------|------|-------|-----------------------|-------|---------------------|------|
| | ТП1 | ТП2 | ТП3 | U, В | I, А | P, kW | P _{общ} , kW | cos f | U, В | I, А |
| 0 | 25 | 25 | 25 | 360 | 270 | 94 | 97 | 0.97 | 360 | 380 |
| 1 | 80 | 75 | 75 | | | | | | | |
| 2 | 120 | 115 | 120 | | | | | | | |
| 3 | 140 | 130 | 135 | | | | | | | |
| 4 | 170 | 160 | 165 | | | | | | | |
| 5 | 210 | 200 | 205 | | | | | | | |
| 6 | 240 | 230 | 235 | | | | | | | |
| 7 | 260 | 250 | 255 | | | | | | | |
| 8 | 290 | 270 | 280 | | | | | | | |

В процессе исследований были определены величины температуры и времени нагрева вышеуказанных охватываемых деталей, при которых обеспечивалась величина сборочного зазора, достаточного для свободной сборки (табл. 3). Требуемая для обеспечения сборочного зазора температура нагрева определялось по формуле:

$$t = \frac{\delta + \Delta}{d\alpha} \quad (1)$$

где δ - требуемый минимальный натяг в сопряжении, определялся по формуле (2), мм;
 Δ - гарантированный зазор для свободной сборки, по опытным данным принят $\Delta = 0,25$ мм;
 α - коэффициент линейного расширения нагреваемого материала, для стали $\alpha = 11,6 \times 10^{-6}$ град⁻¹; d - номинальный диаметр посадочной поверхности, мм.

Таблица 3 – Время и температура нагрева деталей, при которой обеспечивается сборочный зазор

| № | Наименование детали | № детали по чертежу | Ном. диаметр, мм | Натяг min, мкм | Натяг max, мкм | Время нагрева, мин | Температура, С° | Сборочный зазор, мкм |
|----|-----------------------------|---------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | Втулка | ДП 47.31.12.00 | 40 | 24 | 52 | 4 | 165 | 302 |
| 2 | Втулка | ДП 47.31.17.00 | 45 | 27 | 59 | 5 | 170 | 309 |
| 3 | Кольцо лабиринтное | 316.80.10.100 | 160 | 76 | 210 | 4 | 135 | 460 |
| 4 | Кольцо | ДП36.01.05Р01/02 | 160 | 96 | 210 | 4 | 140 | 460 |
| 5 | Шестерня ведущая | 302.30.10.338 | 210 | 125 | 275 | 6 | 240 | 525 |
| 6 | Шестерня ведомая | 302.30.10.339 | 210 | 125 | 275 | 6 | 240 | 525 |
| 7 | Коническая шестерня малая | Д 100.08.004-1 | 110 | 65 | 145 | 6 | 240 | 395 |
| 8 | Корпус буксы | ДП 36.31.01.01 | 80 | 110 | 235 | 5 | 200 | 360 |
| 9 | Корпус буксы | 116.30.10.144 | 180 | 110 | 235 | 7 | 235 | 360 |
| 10 | Корпус буксы с осевым упром | ДП 47.31.11 | 180 | 110 | 235 | 6 | 230 | 360 |

Требуемый минимальный натяг в сопряжении определялся по формуле в зависимости от требуемой прочности соединения:

$$\delta = \frac{\sqrt{R_{oc}^2 + \left(\frac{2M_{кр}}{d}\right)^2}}{\pi \cdot l \cdot f} \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right) 10^6 + 5(R_{a1} + R_{a2}) 10^{-3}, \quad (2)$$

где R_{oc} – продольная осевая сила, стремящаяся сдвинуть деталь относительно оси колесной пары, Н; $M_{кр}$ – крутящий (или тормозной) момент, стремящаяся повернуть деталь относительно оси колесной пары, Н мм; l – длина контакта сопрягаемых поверхностей, мм; f – коэффициент трения сопрягаемых поверхностей, принят $f = 0,1$; E_1, E_2 – модули упругости материала оси и охватывающей детали соответственно, для стали $E_1 = E_2 = 2,01 \cdot 10^{11}$ Па; R_{a1}, R_{a2} – шероховатость охватываемой и охватывающей поверхностей сопрягаемых деталей соответственно, мкм; C_1, C_2 – коэффициенты жесткости по формулам:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_1^2}{d^2 - d_1^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2} + \mu_2,$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона охватываемой и охватывающей детали соответственно, для стали $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; d_1, d_2 – размеры диаметров (рис. 3) принимались из рабочих чертежей, мм.

По полученным данным определялось время нагрева для каждой отдельной детали в зависимости от требуемого сборочного зазора (табл. 3).

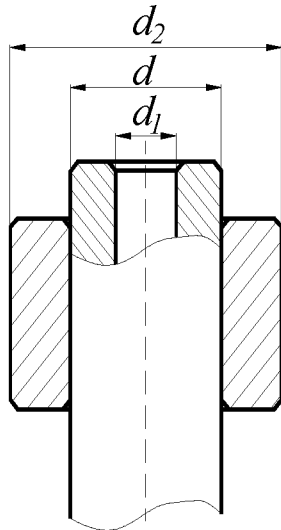


Рис. 3 – Схема соединения

Кроме того, по теории наибольших касательных напряжений производилась проверка на максимально допустимое удельное давление в соединении, при котором отсутствует пластическая деформация на контактных поверхностях соединяемых деталей. Максимальный натяг в соединении не должен превышать предельной величины, мм:

$$\delta_{\max} \leq \delta_{\text{пред}} = P_{\max} d \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \quad (3)$$

где P_{\max} – максимально допустимое удельное давление в контакте, Па. В качестве P_{\max} принимали меньшее из значений:

$$P_{\max 1} = 0,58 \cdot \sigma_{T1} \left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right]; \quad P_{\max 2} = 0,58 \cdot \sigma_{T2} \left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right],$$

где σ_{T1} , σ_{T2} – пределы текучести охватываемой и охватывающей детали соответственно, Па.

Учитывая специфику номенклатуры деталей колесных пар, подлежащих нагреву, были сформулированы основные технические требования к промышленным индукционно-нагревательным установкам для нагрева этих деталей: компактность; высокая производительность; небольшое энергопотребление за счет локального нагрева, контроль температуры нагреваемой детали по времени; применение индуктора С-образного типа.

Спроектированные, изготовленные и внедренные в производство индукционные нагревательные установки для нагрева охватывающих деталей для дальнейшего сопряжения с гарантированным натягом с осью колесной пары позволяют нагревать детали с размерами наружного диаметра до $\varnothing 650$ мм, высотой до 280 мм. Температура нагрева обеспечивает расширение посадочного диаметра детали, необходимого для осуществления ее свободной сборки с зазором с охватываемой деталью. Индукционно нагревательная установка представляет собой С-образный индуктор, смонтированный в металлическом каркасе, имеющим поворотный стол (рис. 4). Индуктор состоит из одного неподвижного С-образного и двух подвижных магнитопроводов и индукционной катушки. Верхний подвижный магнитопровод связан с пневмоприводом для поднятия и опускания на нагреваемую деталь, расположенную на рабочем столе. Нижний вертикальный магнитопровод изготовлен регулируемым по высоте относительно плоскости рабочего стола. Индукционные катушки выполнены медным и теплостойким проводом марки ПСДК и размещаются на верхнем и нижнем магнитопроводах.

Выводы

В результате проведенных исследований по применению метода термовоздействия для сборки колесных пар были сформулированы основные технические требования, на основании которых были спроектированы, изготовлены и внедрены в производство индукционно-нагревательные установки для осуществления нагрева под сборку элементов колесной пары локомотивов. Это позволило повысить надежность и прочность соединений в 2,5 раза, а также повысить производительность труда, улучшить культуру производства, уменьшить занятость площадей цеха. Экономический эффект только для одного локомотиворемонтного завода составил 3,9 млн гривен.

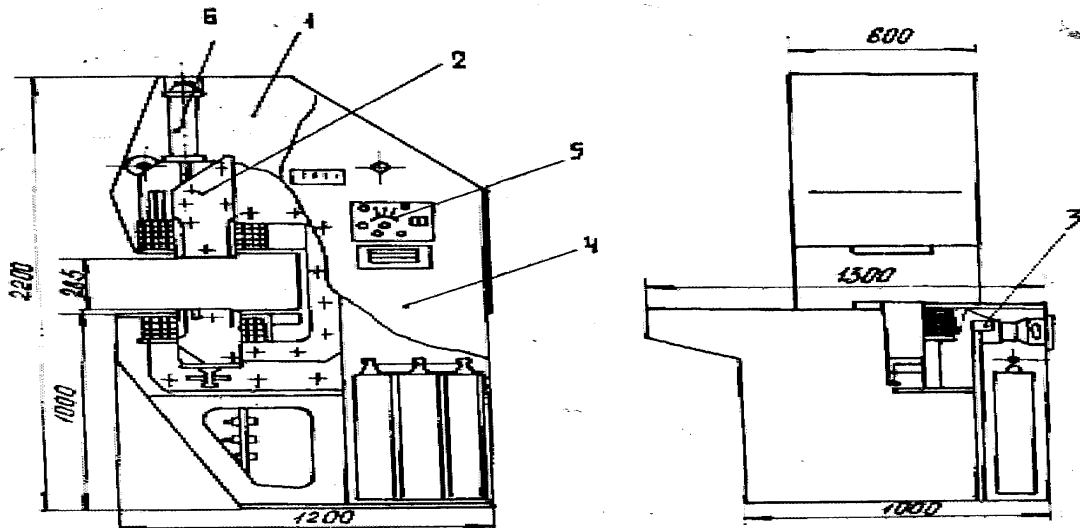


Рис. 4 - Индукционная установка ТПЧ для нагрева под сборку деталей локомотива: 1 - корпус, 2 - индуктор, 3 - механизм ввода термопары, 4 - шкаф с электроаппаратурой, 5 - панель управления, 6 - пневмопривод.

Список використаних джерел:

1. Амелина А. А. Устройство и ремонт вагонных букс с роликовыми подшипниками / А. А. Амелина. – М. : Машиностроение, 1966. – 285 с.
2. Андреев Г. Я. Тепловая сборка в машиностроении / Г. Я. Андреев. – Киев : Техника, 1968. – 210 с.
3. Андреев Г.Я. Прочность тепловых соединений с антикоррозионной пленкой / Г. Я. Андреев, И. Ф. Малицкий // *Техника*. – 1968. – № 14. – С. 12.
4. Смирнов И. П. Развитие технологии ремонта подъемно-транспортного оборудования / И. П. Смирнов // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2009. – № 4. – С. 170-177.
5. Малицкий И. Ф. Индуктор с петлевой катушкой для одновременной сборки двух колес / И. Ф. Малицкий, М. Ю. Коваленко // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2008. – № 2. – С. 128-133.
6. Малицкий И. Ф. Зняття маточини трамвайного колеса з осі колісної пари термовпливом / І. Ф. Малицький, В. І. Єфремова // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2011. – № 7-8. – С. 160-166.
7. Смирнов И. П. Оптимальный размер диаметра соединений с натягом / И. П. Смирнов, И. Ф. Малицкий // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2016. – № 18. – С. 139-144.
8. Малицкий И. Ф. Межребордный размер при формировании колёсной пары термовоздействием / И. Ф. Малицкий, И. П. Смирнов // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2017. – № 20. – С. 130-134.
9. Малицкий И. Ф. Забезпечення якості буксового вузла при складанні колісної пари з термовпливом / І. Ф. Малицький, І. П. Смирнов // *Машинобудування* : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2018. – № 21. – С. 159-164.

References

1. Amelina, AA 1966, *Ustrojstvo i remont vagonnyh buks s rolikovymi podshipnikami*, Mashinostroenie, Moskva.
2. Andreev, GJa 1968, *Teplovaja sborka v mashinostroenii*, Tehnika, Kiev.
3. Andreev, GJa & Malickij, IF 1968, 'Prochnost teplovyh soedinenij s antikorrozionnoj plenkoj', *Tehnika*, no. 14, pp. 12.
4. Smirnov, IP 2009, 'Razvitie tehnologii remonta podemno-transportnogo oborudovanija', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 4, pp. 170-177.
5. Malickij, IF & Kovalenko, MJu 2008, 'Induktor s petlevoj katushkoj dlja odnovremennoj sborki dvuh koles', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 2, pp. 128-133.
6. Malitskiy, IF & Yefremova, VI 2011, 'Zniattia matochyny tramvainoho kola z osi kolenoj pary termovplyvom', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 7-8, pp. 160-166.
7. Smirnov, IP & Malickij, IF 2016, 'Optimalnyj razmer diametra soedinenij s natjagom', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 18, pp. 139-144.
8. Malickij, IF & Smirnov, IP 2017, 'Mezhrebordnyj razmer pri formirovanii koljosnoj pary termovozdeystviem', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 20, pp. 130-134.
9. Malitskiy, IF & Smirnov, IP 2018, 'Zabezpechennia yakosti buksovoho vuzlav pry skladanni kolisnoi pary z termovplyvom', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 21, pp. 159-164.

Стаття надійшла до редакції 26 листопада 2018