

С.В. КАЗАНСЬКИЙ, Г.П. КРИЖОВ, В.І. ВЛАСЕНКО

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ВЗДОВЖ ГІРЛЯНДИ  
ІЗОЛЯТОРІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

С.В. КАЗАНСКИЙ, Г.П. КРЫЖОВ, В.И. ВЛАСЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ  
ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

S. KAZANSKIY, G. KRIZHOV, V. VLASENKO

**RESEARCH OF VOLTAGE DISTRIBUTION ALONG THE  
INSULATOR STRING OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE**

**Анотація.** Наведено обґрунтування доцільності застосування новітніх технологій обслуговування та ремонту повітряних ліній електропередачі під робочою напругою. Проведено аналіз методів визначення розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів повітряної лінії електропередачі, які дозволяють забезпечити персонал під час виконання зазначених робіт.

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередачі, проведення ремонтних робіт під робочою напругою, гірлянда ізоляторів, розподіл напруги.

**Аннотация.** Представлено обоснование целесообразности применения современных технологий обслуживания и ремонта воздушных линий электропередачи под рабочим напряжением. Проведен анализ методов определения распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов воздушной линии электропередачи, позволяющих обеспечить безопасность персонала при проведении указанных работ.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, проведение ремонтных работ под рабочим напряжением, гирлянда изоляторов, распределение напряжения.

**Annotation.** Introduced the substantiation of reasonability of application of current technology of maintenance and restoration of transmission line under operating voltage. Methods of determining voltage distribution along the insulator string of overhead transmission line have been analyzed, they permit to ensure personal safety during these works.

**Key words:** overhead transmission line, carrying out the repair work under the operating voltage, insulator string, voltage distribution.

Забезпечення надійного електропостачання набуває особливого значення за умови характерної для останніх років реорганізації енергетичного сектору, удосконалення взаємин між енергопостачальними компаніями і споживачами та запровадження ринкових відносин. При цьому виконання ремонтів електроустановок традиційними способами (з відключенням і заземленням ліній електропередачі й устаткування на підстанціях) часто призводить до серйозних режимних порушень.

Новітні технології виконання ремонтних робіт на повітряних лініях електропередачі (ПЛ) і підстанціях без їх відключення, тобто під робочою напругою (ПРН) – це ефективний шлях забезпечення надійної й економічної роботи електроустановок усіх класів напруги. На теперішній час створено передумови для докорінного перегляду принципів побудови схем електричних мереж і конструкцій електроустановок з якнайширшим використанням способу їх обслуговування під робочою напругою.

Досвід деяких закордонних країн, насамперед США, свідчить, що споживача не цікавлять проблеми енергопостачальної компанії щодо проведення ремонтних робіт. Він завжди вимагає компенсувати збиток, пов'язаний з порушенням чи погіршенням електропостачання. Тому схеми систем електропостачання і організації ремонтного обслуговування електроустановок повинні розглядатися спільно в єдиному комплексі:

- дослідження і розроблення основних принципів створення високонадійних схем побудови електричних мереж;

- розроблення і впровадження конструкцій електроустановок, адаптованих для обслуговування під напругою;
- розроблення основних підходів і принципів створення технології проведення ремонтних робіт ПРН як основи підвищення надійності й економічності роботи електромереж.

Приклади виконання ремонтних робіт ПРН на траверсі ПЛ 110 кВ наведено на рис. 1.

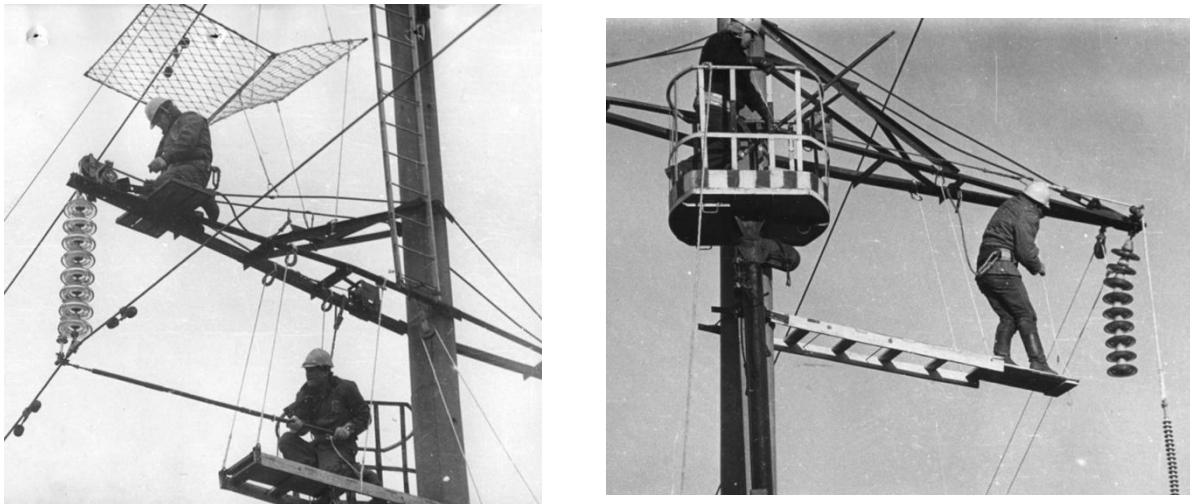


Рис. 1 – Приклади виконання ремонтних робіт ПРН на траверсі ПЛ 110 кВ

Під час виконання робіт з ремонту елементів ПЛ безпосередньо ПРН потрібно виконати ряд технологічних операцій, які пов'язані з розміщенням електромонтерів, пристосувань і обладнання на траверсі і стояку опори ПЛ в зоні електричного поля з напруженістю вище 5 кВ/м. При цьому виникають зміни градієнтів електричного поля, що в свою чергу призводить до зміни розрядних характеристик повітряних проміжків і гірлянд ізоляторів, що ремонтуються.

Дослідження розрядних характеристик повітряних проміжків і гірлянд ізоляторів у разі внесення пристосувань і обладнання в зону опори є дуже громіздкою і складною роботою, якщо її виконувати традиційними випробувальними методами. Більш доцільним є виконання розрахунку електричних полів і розподілу напруги вздовж гірлянд ізоляторів ПЛ за допомогою моделювання, для чого використовуються точні описи опор, проводів, ізолювальних підвісок, пристосувань і обладнання для робіт ПРН, а також інформація про розташування людини в просторі поблизу опори. В результаті таких розрахунків можна отримати необхідну інформацію для визначення «слабкого» місця в технологіях ПРН з точки зору електричної міцності повітряних проміжків.

Допустимий рівень напруженості електричного поля вздовж гірлянди:

$$E_{\text{доп}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{H_i} \leq 2 \div 2,5 \text{ кВ/см},$$

де  $\Delta U_{\text{доп}}$  – допустимий рівень падіння напруги на ізоляторі;  $H_i$  – висота ізолятора.

Традиційна розрахункова методика дає змогу досить точно оцінити розподіл напруги тільки при відносно малій кількості ізоляторів у гірляндах (до 4 – 10). Для гірлянд з більшою довжиною традиційна методика дає завищені оцінки падіння напруги на ізоляторах. Причиною таких розбіжностей є нехтування зміною ємностей ізоляторів відносно землі і проводу. Загальний вигляд розташування гірлянди наведено на рис. 3, а відповідну схему заміщення – на рис. 4, де позначено:  $K$  – власна ємність ізолятора;  $C_1$  – ємність металевих елементів ізоляторів відносно заземлених частин;  $C_2$  – ємність металевих елементів ізоляторів відносно проводів;  $R$  – опір витoku по поверхні ізоляторів.

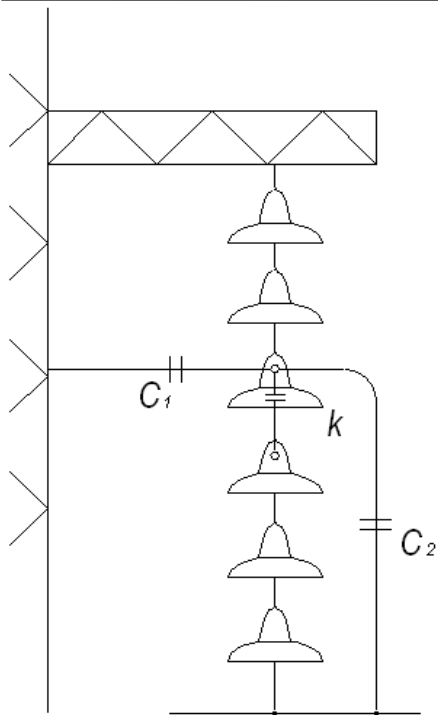


Рис. 3 – Загальний вигляд гірлянди

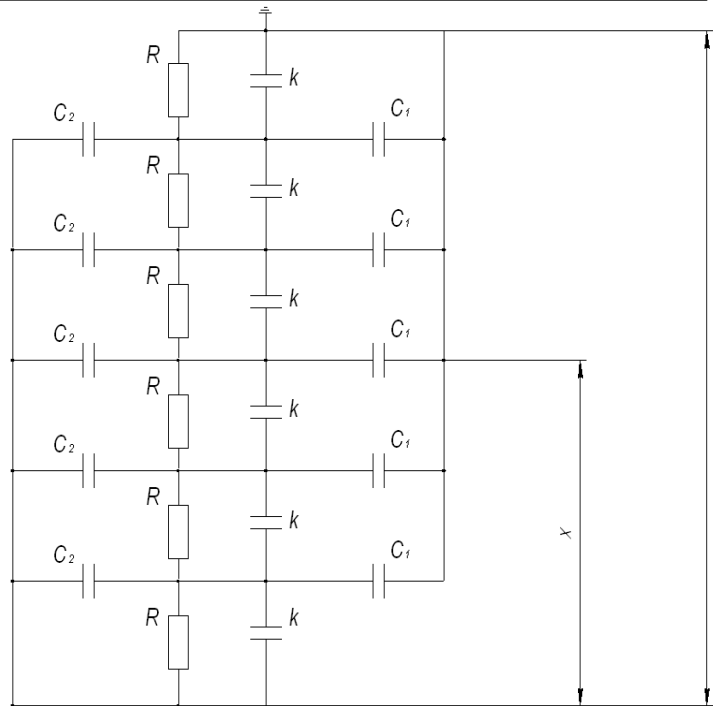


Рис. 4 – Схема заміщення гірлянди

Розрахункову схему для моделювання розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів наведено на рис. 5, де позначено:  $N_n$  – номер ділянки проводів;  $P$  – номер складових проводу;  $S$  – номер ділянок опори;  $m$  – номер ізоляторів;  $C_{i3}$  – ємність одиничного ізолятора;  $q$  – заряди шапок ізоляторів;  $U$  – падіння напруги на ізоляторах.

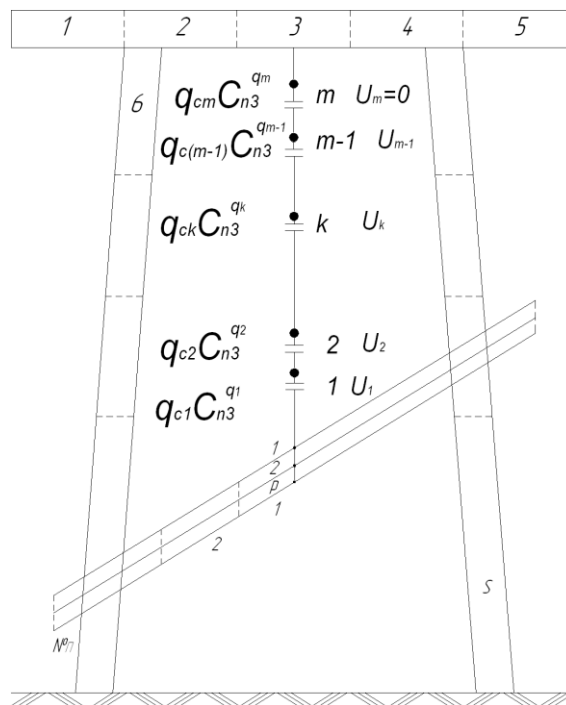


Рис. 5 – Схема моделювання розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів

Розрахункову схему для визначення падіння напруги на одноланцюговій гірлянді наведено на рис. 6.

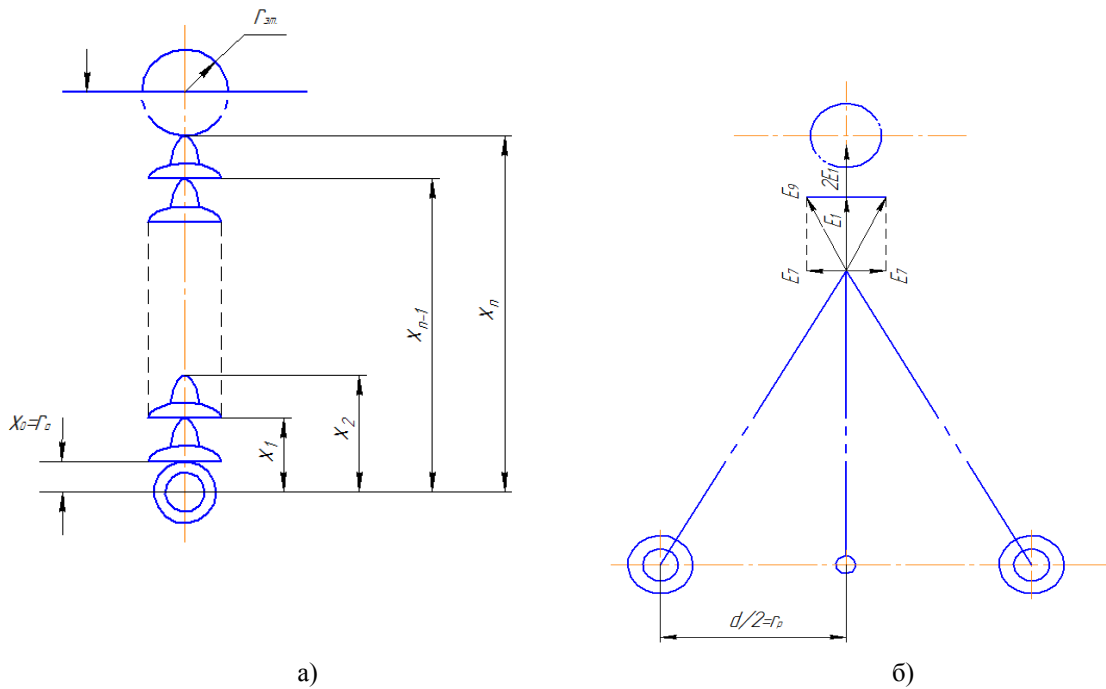


Рис. 6 – Схема для визначення падіння напруги на одноланцюговій гірлянді:  
 а) – з нерозщепленим фазним проводом; б) – з фазою, розщепленою на два проводи

Згідно з наведеними вище позначеннями падіння напруги на ізоляторі від заряду проводу:

$$\Delta U_n = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{X_n}{X_{n-1}} \frac{2H_{np} + X_{n-1}}{2H_{np} + X_n} \quad (1)$$

Так як висота підвісу проводу є значною більшою порівняно з будівельною висотою ізолятора  $H_i$ , то

$$\frac{2H_{np} + X_{n-1}}{2H_{np} + X_n} \approx 1,$$

а формула (1) набуває вигляду:

$$\Delta U_n \approx \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{X_n}{X_{n-1}} \quad (2)$$

Для першого від проводу ізолятора

$$X_0 = r_2 \text{ та } X_1 = r_a + H_i,$$

Тоді

$$\Delta U_1 = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_a + H_i}{r_a} \quad (3)$$

де  $r_a$  – радіус кола, що охоплює елемент підтримувального затискача.

При розщепленні фази на два проводи (рис. 5)

$$\Delta U_n = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{r_p^2 + X_n^2}}{\sqrt{r_p^2 + X_{n-1}^2}} \quad (4)$$

Для першого від проводу ізолятора аналогічно (3)

$$\Delta U_1 = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{\frac{r_p^2 + (r_i + H_i)^2}{r_p^2 + r_a^2}} \approx \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{r_a + H_i}{r_p}\right)^2} \quad (5)$$

Вплив арматури, розташованої уперек проводів, може бути врахований шляхом умовного розвороту коромисла вздовж фази проводів. Додаючи падіння напруги на першому ізоляторі від заряду проводу і заряду коромисла, отримуємо падіння напруги на ізоляторах.

$$\Delta U_n = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{r_a + H_i}{r_p}\right)^2} + \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{X_n}{X_{n-1}} \quad (6)$$

Відповідно до виразу (6) при збільшенні радіусу розщеплення проводу складова падіння напруги від заряду на проводі швидко зменшується. Отже, формули (3), (5), (6) визначають поступове зменшення падіння напруги на ізоляторах по мірі віддалення від проводу. Для отримання дійсної картини поля потрібно врахувати поле заряду на траверсі. Так як заряд на траверсі протилежний за знаком заряду на проводі, падіння напруги на ізоляторах гірлянди за умови врахування впливу траверси збільшується тим більше, чим ближче ізолятор знаходиться до траверси.

$$\Delta U_{nm} = -\frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_m - H_{np} - X_{n-1}}{H_m - H_{np} - X_n} \frac{2H_{np} - X_n}{2H_{np} - X_{n-1}} \approx -\frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_m - H_{np} - X_{n-1}}{H_m - H_{np} - X_n} \quad (7)$$

де  $\Delta U_{nm}$  – падіння напруги на  $n$ -му ізоляторі від заряду  $g_m$  на траверс  $m$ .

Згідно з (7) значення  $\Delta U_{nm}$  мають бути додані до значень  $\Delta U_n$ , визначених згідно (2) для одиночного і згідно (6) для розщепленого проводу.

Результати розрахунків розподілу напруги вздовж гірлянди ПЛ 330 кВ, виконані з урахуванням (2) – (7), наведено на рис. 7.

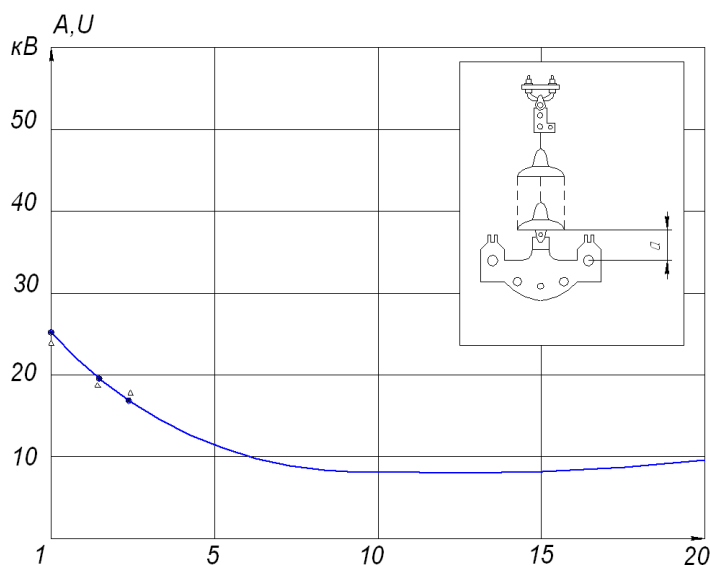


Рис. 7 – Результати розрахунків розподілу напруги вздовж гірлянди ПЛ 330 кВ

Для ПЛ з одиночним проводом розподіл напруженості поля вздовж осі гірлянди визначається формулою:

$$E_x = \frac{g_{np}}{2\pi\epsilon_0} - \frac{g_r}{2\pi\epsilon_0(H_r - H_{np} - X)} \quad (8)$$

При довільній кількості проводів у фазі формула розподілу напруженості поля від заряду на проводах приймає вигляд:

$$E_{np\ max} = \frac{0,72q_{np}}{2\pi\epsilon_0 r_p} \left(1 - \frac{0,6}{n}\right) \quad (9)$$

Отже, максимальна напруженість поля від заряду на проводі зменшується обернено пропорційно радіусу розщеплення проводів. З урахуванням заряду на елементах опори ПЛ і заряду траверси максимальна напруженість поля:

$$E_{max} = \frac{0,72q_{np}}{2\pi\epsilon_0 r_p} \left(1 - \frac{0,6}{n}\right) + \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0(x_e - x_a)} - \frac{q_m}{2\pi\epsilon_0(H_T - H_{np} - x_e)}, \quad (10)$$

де  $x_a$  – координата центра підтримуючого затискача.

Найбільше падіння напруги на ізоляторі може бути знайдено як добуток максимальної напруженості поля та будівельної висоти ізолятора:

$$\Delta U_{max} = E_{max} H_i \quad (11)$$

**Висновки.** За результатами наведених розрахунків можна уточнювати фактичні рівні напруженості поля вздовж осі гірлянди ізоляторів ПЛ різних класів напруги, що, в свою чергу, дозволить забезпечити перебування персоналу під час обслуговування та ремонту ПЛ під робочою напругою.

#### Література:

1. ПБЕЕ (ДНАОП 1.1.10-1.01-2000). Правила безпечної експлуатації електроустановок. Затверджені наказом Комітету з нагляду за охороною праці України від 21.01.2000 р. № 20, зареєстровані Міністерством юстиції України 06.04.2000 р. за № 213/4434.
2. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. Передавання електроенергії. Глава 2.5. Повітряні лінії електропередачі напругою вище 1 кВ до 750 кВ. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2006.
3. Инструкция для работ под напряжением на ВЛ 750 кВ // Е.И. Удод, О.И. Кульматицкий, В.Л. Таловерья – Киев, 1984.
4. Удод Е.И. Пути повышения эффективности работы электрических сетей // Тез. докл. республ. научно-техн. конф. «Современные проблемы энергетики» – К.: Ин-т электродинамики АН УССР, 1985.
5. Скляр В.Ф., Удод Е.И., Молчанов В.Н. и др. Ремонт электроустановок под напряжением // Электрические станции, 1987, № 6.
6. Г.П. Крижов, Т.С. Удод, В.Л. Таловерья. Обслуговування електричних мереж під робочою напругою // Електропанорама, № 1-2 – 10, 2012 р.

УДК 621.036.7

А.В. ЕФИМОВ, А.Л. ГОНЧАРЕНКО, Л.В. ГОНЧАРЕНКО

## РАЗРАБОТКА ПЛАСТИНЧАТОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ КОНДЕНСАЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

ALEXANDER V. YEFIMOV, ALEXANDER L. GONCHARENKO, LEONID V. GONCHARENKO

## DEVELOPMENT OF PLATE AIR HEATERS CONDENSING HEAT RECOVERY SYSTEM FOR

**Аннотация.** Продемонстрована принципова можливість використання в системі для утилізації теплоти відхідних газів котельних агрегатів повітропідігрівача пластинчатого типу, яка дозволяє виключити малонадійні в експлуатації рухомі елементи і присмоккти повітря в продукти спалювання палива. Запропоновано метод розрахунку повітропідігрівача і розроблена його конструкція.

**Анотация.** Продемонстрирована принципиальная возможность использования в системе для утилизации теплоты уходящих газов котельных агрегатов конденсационного воздухоподогревателя пластинчатого типа, которая позволяет исключить малонадежные в эксплуатации движущиеся элементы