

Л.А. ВАРДАНЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ  
КОНДЕНСАТОРОВ С ОХЛАЖДАЕМЫМИ ВОДОЙ ОДНИМ И ДВУМЯ  
ЗМЕЕВИКАМИ**

Исследуется макетный образец конденсаторного типа с одним и двумя змеевиками, охлаждаемыми водой. Расчетные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$ , полученные на основе теории подобия с применением критериев Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, сравнены с экспериментальными результатами. Результаты экспериментального определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$  с двумя охлаждающими змеевиками положены в основу методики расчета электротермических конденсаторов с буржуйно-масляным диэлектриком и фольговыми обкладками. Экспериментальные данные коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$ , полученные на основе модели с одним охлаждающим змеевиком, хорошо согласуются с расчетными значениями коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$ .

Показано, что расчетные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$ , полученные на основе теории подобия, хорошо согласуются с экспериментальными данными при масштабном коэффициенте, равном 6.

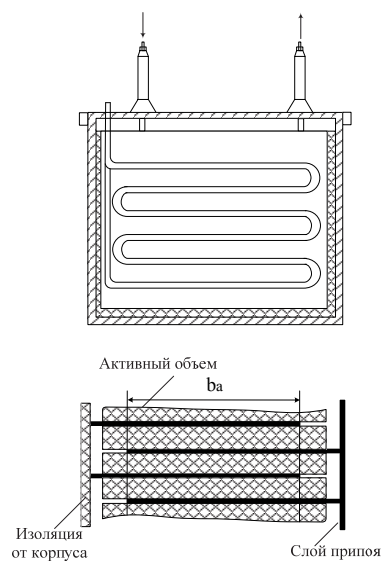
**Ключевые слова:** конденсатор, коэффициент теплоотдачи, перегрев, охлаждение водой, змеевик, метод подобия, критерии Нуссельта -  $Nu$ , Рейнольдса -  $Re$ , Прандтля -  $Pr$ .

**Введение.** Обычно силовые электротермические конденсаторы охлаждаются водой при помощи змеевика, припаянного к выступающей фольге с одного торца секции.

Фольговые обкладки, как видно из рис.1, соединены параллельно по отношению к тепловому потоку.

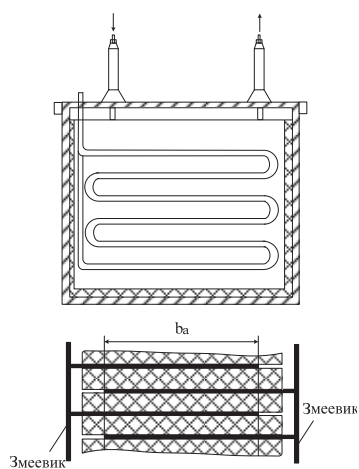
В указанной конструкции электротермических конденсаторов охлаждение происходит через выступающую фольговую обкладку, соединенную с охлаждающей системой только с одной торцевой стороны секции.

Для более интенсивного охлаждения конденсатора предлагается осуществлять теплоотвод с торцов секций с помощью двух охлаждающих змеевиков, припаяваемых к выступающим обкладкам пакета секции с обоих торцов. Охлаждающие змеевики одновременно служат собирательными выводами конденсатора, а наличие охлаждающей воды позволяет резко увеличить допустимую плотность тока в выводах (рис.2).



*Рис.1. Охлаждение конденсатора с одним змеевиком*

Для отвода нагретой воды используют два дополнительных изолятора, установленных на крышке конденсатора.



*Рис.2. Охлаждение конденсатора с двумя змеевиками*

При охлаждении змеевиками водой для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$  можно воспользоваться формулой для прямой трубы, выведенной из критериального уравнения (3), с последующим введением поправки для учета наличия закруглений в змеевике:

$$\alpha_T = Nu \frac{\lambda_g}{d} \left(1 + 1,77 \frac{d}{R}\right), \quad (1)$$

где  $\lambda_g$  - коэффициент теплопроводности воды при 20°C,  $\lambda_g = 0,515 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м} \cdot \text{град}$ , который берется по известной таблице [1];  $d$  - внешний диаметр змеевика,  $d = 0,01 \text{ м}$ ;  $R$  - радиус закругленной части змеевика,  $R = 0,03 \text{ м}$ .

Выражение в правой части формулы (1), взятое в скобки, учитывает поправку на наличие закруглений в змеевике.

По известному коэффициенту  $Nu$  определяется  $\alpha_T$ :

$$\alpha_T = 93 \cdot \frac{0,515}{0,01} \left(1 + 1,77 \cdot \frac{0,01}{0,03}\right) = 0,883 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}. \quad (2)$$

Критериальное уравнение для теплоотдачи в прямой трубе при турбулентном (вихревом) движении имеет вид [1]

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (3)$$

Критерий Прандтля берется по известной таблице [1], а критерий Рейнольдса вычисляется по формуле

$$Re = \frac{V_g d}{\vartheta_g}, \quad (4)$$

где  $V_g$  - скорость воды,  $V_g = 1,2 \text{ м/с}$ , которая определена экспериментальным путем;  $\vartheta_g$  - кинематическая вязкость воды,  $\vartheta_g = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

$$Re = \frac{1,2 \cdot 0,01}{1 \cdot 10^{-6}} = 12000. \quad (5)$$

**Экспериментальное исследование по определению коэффициента теплоотдачи  $\alpha_T$ .** Исследование проводилось на модели конденсатора, представляющего собой обкладки конденсаторного типа, присоединенные к змеевику длиной 0,3 м. В качестве нагревательного элемента, имитирующего потери конденсаторной бумаги, использовались нагреватели с односторонней и двусторонней намотками нагревательного элемента. С целью равномерного распределения мощности нагревательные элементы с обеих сторон прокладывались листовой слюдой толщиной 0,5 мм. Поверх нагревательного элемента и слюды прокладывалась кабельная бумага толщиной 80 мкм (что равносильно толщине 10 слоев конденсаторной бумаги толщиной 8 мкм) [2,3].

Так называемый “сэндвич” прокладывается между обкладками, охлаждаемыми водой. За счет изменения напряжения мощность нагревательного элемента изменялась в пределах 100...400 Вт. Напряжение измерялось с помощью вольтметра класса 0,5, а ток нагревательного элемента контролировался с помощью амперметра класса 0,5.

Температура на входе и выходе змеевиков измерялась ртутными термометрами со шкалой 0...55 °С и ценой деления шкалы 0,1 °С с погрешностью  $\pm 0,4$ . Перегревы контролировались инфракрасным термометром НСЛУЕТ НТ-830 китайского производства со шкалой -50...380 °С, результаты которых отличались на 0,1...0,2 °С [2,3].

Результаты эксперимента с одним охлаждающим змеевиком приведены в табл.1, а с двумя охлаждающими змеевиками - в табл.2 при одинаковой скорости воды, равной 1,2 м/с.

В табл.1 отсутствуют значения  $\alpha_T$  и  $\Delta t$  при 300 и 400 Вт в связи с тем, что с одним змеевиком перегревы получились большими из-за слабого охлаждения.

Охлаждающая поверхность змеевика рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{охл} = \pi dL, \quad (6)$$

где  $L$  - длина змеевика,  $L = 227$  см.

Таблица 1

Перегревы модели конденсатора с одним охлаждающим змеевиком  
при  $S_{охл} = 713$  см<sup>2</sup>

| $P$ ,<br>Вт | $t_1$ (вход),<br>°С | $t_2$ (выход),<br>°С | $\Delta t$ ,<br>°С | $\alpha_T$ ,<br>Вт/см <sup>2</sup> ·град |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|------------------------------------------|
| 100         | 31                  | 31,2                 | 0,2                | 5,3                                      |
| 200         | 31,7                | 32,1                 | 0,4                | 5,3                                      |

Таблица 2

Перегревы модели конденсатора с двумя охлаждающими  
змеевиками при  $S_{охл} = 713$  см<sup>2</sup>

| $P$ ,<br>Вт | $t_1$ (вход),<br>°С | $t_2$ (выход),<br>°С | $\Delta t$ ,<br>°С | $\alpha_T$ ,<br>Вт/см <sup>2</sup> ·град |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|------------------------------------------|
| 100         | 29,5                | 29,5                 | 0                  | -                                        |
| 200         | 30,3                | 30,5                 | 0,2                | 10,6                                     |
| 300         | 31,3                | 31,6                 | 0,3                | 10,6                                     |
| 400         | 32,7                | 33,1                 | 0,4                | 10,6                                     |

Сравнение табл. 1 и 2 показывает, что отношение перегревов и соответствующих коэффициентов теплоотдачи с одним и двумя змеевиками составляет два раза. Охлаждение с двумя змеевиками снижает перегревы конденсаторов в два раза [2,3].

**Обсуждение результатов исследования.** На основании экспериментальных данных с одним охлаждающим змеевиком и расчетных значений  $\alpha_T$  можно определить масштабный коэффициент  $M_k$  при различных напряжениях и частотах для бумажно-фольговых электротермических конденсаторов и конденсаторов с комбинированным диэлектриком.

Кроме того, имея расчетные значения  $\alpha_T$ , можно определить перегревы температуры реальных конденсаторов с одним змеевиком по формуле

$$\Delta t = \frac{P}{\alpha_T S_{охл}}. \quad (7)$$

Здесь  $P = Q \cdot tg\delta = 400 \cdot 10^3 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} = 1520 \text{ Вт}$  (для конденсатора марки ЭСВ-0,8-10-2-У3), где  $P$  - активные потери конденсатора,  $Вт$ ;  $Q$  - реактивная мощность конденсатора,  $кВАр$ ;  $tg\delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора.

Подставляя численные значения в формулу (7), получим для  $\Delta t = 2,41 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Следовательно, появляется возможность определения масштабного коэффициента  $M_k$  путем сравнения расчетного и экспериментального значений  $\alpha_T$ . Масштабный коэффициент  $M_k$  дает возможность сравнить расчетные и экспериментальные отклонения реальных конденсаторов:

$$\alpha_T = \frac{P_{экс}}{\Delta t_{экс} S_{экс}} = M_k \frac{P_{рас}}{\Delta t_{рас} S_{рас}}, \quad (8)$$

где  $P_{экс}$  - экспериментальное значение мощности,  $Вт$ ;  $\Delta t_{экс}$  - экспериментальное значение перегрева,  $^\circ\text{С}$ ,  $\Delta t_{экс} = 0,4 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $S_{экс}$  - экспериментальное значение поверхности охлаждения змеевиков,  $см^2$  (экспериментальное значение  $L$  выбираем равным  $30 \text{ см}$ , что составляет прямолинейный участок змеевика, следовательно,  $S_{экс} = 3,14 \cdot 1 \cdot 30 = 94,2 \text{ см}^2$ );  $P_{рас}$  - расчетное значение мощности,  $Вт$ ;  $\Delta t_{рас}$  - расчетное значение перегрева,  $^\circ\text{С}$ ;  $S_{рас}$  - расчетное значение поверхности охлаждения змеевиков,  $см^2$  (для конденсатора марки ЭСВ-0,8-10-2-У3);

$$M_k = \frac{P_{экс} \cdot \Delta t_{рас} \cdot S_{рас}}{\Delta t_{экс} \cdot S_{экс} \cdot P_{рас}}. \quad (9)$$

Подставляя численные значения в формулу (9), получим  $M_k = 6,000426$ .

Следовательно, коэффициент теплоотдачи  $\alpha_T$  равен

$$\alpha_T = \frac{\alpha_{Tэкс}}{M_k}. \quad (10)$$

Подставляя численные значения в формулу (10), получим  $\alpha_T = 0,883 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}$ .

С другой стороны, экспериментальный масштабный коэффициент равен

$$M_k = \frac{\alpha_{T_{\text{эк}}}}{\alpha_{T_{\text{рас}}}}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{T_{\text{эк}}}$  - экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи,  $\text{Вт/см}^2 \cdot \text{град}$ ;  
 $\alpha_{T_{\text{рас}}}$  - расчетное значение коэффициента теплоотдачи,  $\text{Вт/см}^2 \cdot \text{град}$ ;  
 $M_k = 6,0022$ .

Следовательно, экспериментальные и расчетные значения отклонения  $M_k$  составят  $\delta = 0,2\%$ .

Таким образом, появляется возможность определения  $M_k$  путем сравнения расчетного и экспериментального значений  $\alpha_T$  при различных напряжениях и частотах конденсаторов, охлаждаемых одним змеевиком.

Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями  $M_k$ , рассчитанными для различных напряжений и частоты, составляет 0,144%.

#### **Выводы**

1. Увеличение поверхности охлаждения за счет применения второго змеевика позволяет снизить активную мощность конденсатора в два раза.
2. Охлаждение конденсатора двумя змеевиками показывает, что при перепаде температуры  $\Delta t$  в два раза при той же мощности конденсатора коэффициент теплоотдачи  $\alpha_T$  увеличивается вдвое.
3. Путем увеличения  $\alpha_T$  при охлаждении двумя змеевиками можно увеличить частоту электротермических конденсаторов вдвое с небольшой корректировкой емкости.
4. На основании расчетных и экспериментальных данных с большой точностью определены значения  $M_k$  для электротермических конденсаторов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы.- Л.: Энергия, 1969. - 592 с.
2. Варданян Л.А. Повышение рабочей частоты бумажно-фольговых конденсаторов за счет применения двух охлаждаемых водой змеевиков // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика.- Ереван, 2018.- №2.- С. 69-76.
3. Արտոնագիր №3224А Ջրային հովացումով կոնդենսատոր / Լ.Ա. Վարդանյան, Մ.Ք. Բաղդասարյան, Պ.Հ. Խաչատրյան, Է.Վ. Կուրդինյան.- Հրապարակված է 01.10.2018թ.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 14.06.2019.

Լ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

**ՋՐՈՎ ՀՈՎԱՑՎՈՂ ՄԵԿ ԵՎ ԵՐԿՈՒ ԳԱԼԱՐԱԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐՈՎ  
ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՏՎՈՒԹՅԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Ուսումնասիրվել է ջրով հովացվող կոնդենսատորային տեսակի մակետային նմուշ՝ մեկ և երկու գալարախողովակներով:  $\alpha_T$  ջերմատվության գործակցի հաշվարկային արժեքները ստացվել են նմանության տեսության համաձայն՝ Նուսսելտի, Ռեյնոլդսի և Պրանդտլի չափանիշների կիրառմամբ, և համեմատվել են փորձնական արդյունքների հետ: Երկու գալարախողովակով  $\alpha_T$  ջերմատվության գործակցի փորձնական տվյալների որոշման հիմքում ընկած է թղթայուղային դիէլեկտրիկով և նրբաթիթեղային շրջադիրներով էլեկտրաջերմային կոնդենսատորների հաշվարկման մեթոդը:

$\alpha_T$  ջերմատվության գործակցի փորձնական տվյալները, որոնք ստացվել են երկու հովացնող գալարախողովակով մոդելի վրա, լավ համընկնում են  $\alpha_T$  ջերմատվության գործակցի հաշվարկային արժեքների հետ, երբ մասշտաբային գործակիցը կազմում է 6:

**Առանցքային բառեր.** կոնդենսատոր, ջերմատվության գործակից, գերտաքացում, ջրային հովացում, գալարախողովակ, նմանության մեթոդ, Նուսսելտի  $Nu$ , Ռեյնոլդսի  $Re$  և Պրանդտլի  $Pr$  չափանիշներ:

L.A. VARDANYAN

**DETERMINING THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF  
CAPACITORS WITH ONE AND TWO WATER COOLED COILS**

A sample of a capacitor type with one and two water-cooled coils is investigated. The calculated values of the heat transfer coefficient  $\alpha_T$  obtained on the basis of the similarity theory using the Nusselt, Reynolds and Prandtl criteria are compared with the experimental results. The results of the experimental determination of the heat transfer coefficient  $\alpha_T$  with two cooling coils form the basis of the method for calculating electrothermal capacitors with a paper-oil dielectric and foil plates. The experimental data on the heat transfer coefficient  $\alpha_T$ , obtained on the basis of the model with one cooling coil, are in good agreement with the calculated value of the heat transfer coefficient  $\alpha_T$ .

It is shown that the calculated values of the heat transfer coefficient  $\alpha_T$  obtained on the basis of the similarity theory are in good agreement with the experimental data at a scale factor of 6.

**Keywords:** capacitor, heat transfer coefficient, overheating, water cooling, coil, similarity method, criteria Nusselt, Reynolds, Prandtl.