

*Сорока Е.А.,  
к.т.н. Папазов Ю.Н.  
(УкрНИИВЭ, г. Донецк, Украина,  
tr@ukrniive.com.ua)*

### **ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ РУДНИЧНОГО ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ЕГО ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

*Наведені результати експериментальних досліджень, отримані залежності, які визначають тепловий стан активної частини вибухо- захищених трансформаторів потужністю 1000 та 1250 кВ·А пересув- них підстанцій в залежності від конструкції їх оболонки.*

***Ключові слова:** вибухозахищений трансформатор, активна час- тина, перевищення температури, оболонка, тепловий стан, система охолодження.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований, полу- чены зависимости, определяющие тепловое состояние активной части взрывозащищенных трансформаторов мощностью 1000 и 1250 кВ·А передвижных подстанций в зависимости от конструкции их оболочки.*

***Ключевые слова:** взрывозащищенный трансформатор, активная часть, превышение температуры, оболочка, тепловое состояние, сис- тема охлаждения.*

**Постановка проблеми.** Взрывозащищенный рудничный транс- форматор естественного воздушного охлаждения конструктивно пред- ставляет собой статический электромагнитный аппарат, активная часть которого (силовой трехстержневой двухобмоточный трансформатор) по- мещена во взрывонепроницаемую оболочку, являясь основной сборочной единицей в составе комплектной трансформаторной подстанции (КТП) серии КТПВ мощностью 100...1000 кВ·А (ТУ У 31.1-00217159-034-2002).

Герметичная оболочка сухих взрывозащищенных трансформато- ров (ТСВ), температура которой является функцией потерь, выделяемых элементами активной части, а также интенсивности конвективного теп- лообмена внутри нее и внешней теплоотдачи, исключает доступ внутрь оболочки наружной охлаждающей воздушной среды, создавая тем са- мым напряженный тепловой режим работы активной части, что приво- дит к повышению рабочей температуры обмоток и магнитопровода и

необходимости применения дорогостоящей кремнийорганической изоляции классов нагревостойкости Н и 200 по ГОСТ 8865-93 [1].

Основными тепловыми характеристиками трансформатора типа ТСВ, определяющими его тепловое состояние, являются: среднее превышение температуры обмоток высшего и низшего напряжения (ВН и НН) –  $\Theta_{ВН, НН}$ ; наибольшее превышение температуры обмоток НН –  $\Theta_{ННmax}$ ; наибольшее превышение температуры магнитопровода –  $\Theta_{mag. max}$ . Главнейшие из них, необходимые для проверки соответствия изделий требований вышеуказанных нормативных документов, это средние и максимальные превышения температуры обмоток.

Экспериментальные исследования определили негативное влияние оболочек на тепловое состояние трансформаторов в целом и прежде всего на предельно допустимую температуру активных частей ( $\Theta_{max}$ ;  $\Theta_{cp}$ ). Поэтому анализ влияния взрывонепроницаемой оболочки на тепловой режим активной части актуален как в теоретическом, так и в практическом аспекте данной проблемы, непосредственно связанной с выбором и расчетом системы охлаждения трансформаторов рудничных КТП.

**Анализ исследований и публикаций.** При работе трансформатора часть электромагнитной энергии превращается в тепло, рассеиваемое в окружающую среду. Главными источниками тепла являются обмотки ВН и НН, выделяющие примерно 80 % всех потерь, и магнитопровод. Для них окружающей средой является замкнутое воздушное пространство в герметичной оболочке, служащей своеобразным теплообменником, воспринимающим тепловые потоки за счет естественной конвекции внутреннего воздуха и передающим тепло окружающей среде. Вследствие этого оболочка нагревается до определенного превышения температуры над температурой окружающей среды  $\Theta_{об}$ , значение, которого зависит от времени (нестационарное или стационарное температурное поле) и в локальных участках ее поверхности может существенно изменяться по координатам теплового поля, что определяется конструктивными особенностями оболочки. Следовательно, на тепловое состояние активной части сухого рудничного трансформатора оказывает влияние не только его исполнение по уровню и виду взрывозащиты, но и конструкция отдельных элементов системы охлаждения, являющейся важнейшим функциональным узлом трансформатора, обеспечивающим заданный температурный режим всех его составных частей [1].

Нагревание трансформатора характеризуется, прежде всего, распределением тепловых потерь в его обмотках и магнитной системе, а также процессами теплообмена, в том числе конвекцией внутри оболочки и ее внешней теплоотдачей, интенсивность которой определяется коэффициентом теплоотдачи (КТО), от значения которого зависит превышение температуры ТСВ при данной нагрузке, выражаемое зависимостью [2]:

$$\Theta_{уст} = P / (\alpha \cdot F),$$

где  $P$  – потери в трансформаторе;

$\alpha$  – КТО;

$F$  – площадь теплоотдающей поверхности оболочки.

Повысить КТО теплоотдающих поверхностей оболочки, являющегося функцией ряда переменных ( $\alpha = f(\varphi, l, v, \rho, W, \Theta_{нов}, \Theta_{сп})$ ), – значит увеличить интенсивность теплоотдачи от них и интенсивность охлаждения трансформатора в целом. Поэтому при исследованиях теплового состояния рудничных КТП естественного охлаждения наряду с исследованием нагревания активных частей [3] значительное внимание уделялось изучению теплового поля оболочек с целью анализа и оптимизации по теплоотдаче их конструкции [4].

**Постановка задачи.** Анализ влияния взрывонепроницаемой оболочки трансформатора взрывозащищенного исполнения различной номинальной мощности и типоразмера, как составной сборочной единицы КТП, на его основные тепловые характеристики в стационарном режиме нагрева.

**Основной материал и результаты исследований.** Вышеизложенное позволяет утверждать – теплопередача через оболочку ТСВ представляет сложный процесс отвода теплоты от его активной части в окружающую внешнюю среду, определяющий высокую температуру внутреннего воздуха. Тепловые исследования подстанции ТСВП-400/6 [5] с применением современной термоанемометрической аппаратуры обнаружили наличие активного процесса конвективного теплообмена внутри герметичной оболочки, что констатируют данные таких теплофизических параметров как температура и скорость теплоносителя, которые в верхней части оболочки достигают следующих экстремальных значений:  $\Theta_{max} = 78...81^\circ\text{C}$ ;  $W_{max} = 0,95...1,27$  м/с. Скорость теплового воздушного потока, выходящего из оболочки через экспериментальное отверстие, составила 3,57 м/с, что для свободной конвекции является очень значительной величиной. Отсюда следует, что условия охлаждения обмоток очень тяжелые, так как они кроме непосредственного нагрева испытывают также взаимный подогрев и подогрев от магнитопровода, в результате чего их тепловые параметры ( $\Theta_{ННсп}$ ,  $\Theta_{ВНсп}$  и  $\Theta_{ННmax}$ ) достигают значительных величин.

Для определения зависимости приведенных параметров обмоток ВН и НН от условий охлаждения необходимо исследовать нагревание активной части в двух принципиально различных вариантах ее теплового состояния – при свободном теплообмене с окружающей воздушной средой (без оболочки) и без свободного теплообмена с окружающей средой (в оболочке).

Для ТСВ подстанций серии КТПВ мощностью 100...630 кВ·А провести анализ таких режимов не представляется возможным по причине отсутствия соответствующих экспериментальных данных. Для КТП мощностью 1000 кВ·А (рисунок 1) сравнительный анализ двух тепловых режимов при номинальной нагрузке  $P = 1000$  кВ·А показывает следующее (таблица 1).

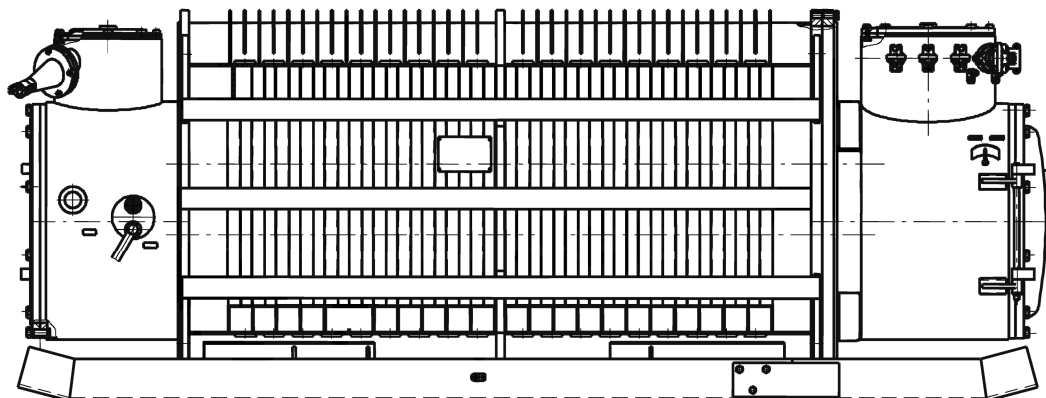


Рисунок 1 – Общий вид трансформаторных подстанций типа КТПВ-1000/6 и КТПВ-1250/6

Таблица 1 – Распределение теплового поля обмотки низшего напряжения КТПВ-1000/6 в различных условиях охлаждения

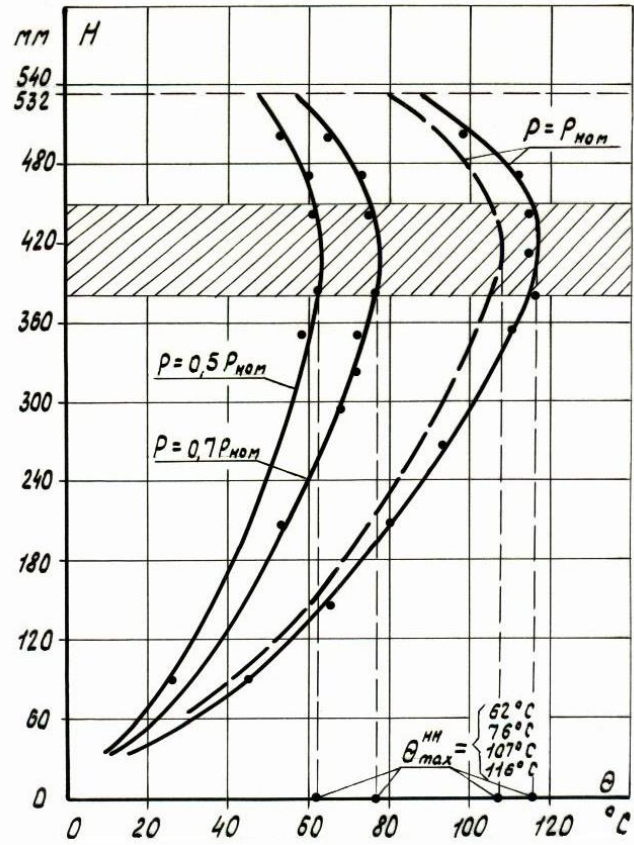
Этап исследований	Режим нагревания	Превышение температуры, °С, в канале обмотки НН фазы В по номерам термопар									
		28	29	30	32	33	34	35	36	38	39
Активная часть без оболочки	Режим 1 – продолжительный при $P_{ном} = 1000$ кВ·А и $\Theta_{окр} = 13^\circ\text{C}$	45	66	80	98	102	111	116	114	111,6	98
	Режим 2 – продолжительный при $P_{ном} = 1000$ кВ·А и $\Theta_{окр} = 17^\circ\text{C}$	107	135	155	179	188	193	199,4	195	185	180
Активная часть в оболочке КТП	Режим 3 – повторно-кратковременный при ПВ = 60 %, $P_{ном} = 1000$ кВ·А и $\Theta_{окр} = 24^\circ\text{C}$	99	109	120,5	135	138	149,5	154	148	147	138

Наблюдается определенное изменение в распределении теплового поля по высоте обмотки НН, что иллюстрируют зависимости вида  $\Theta_{НН} = f(H_{обм})$  (рисунки 2, 3). Температурные кривые для нагрузочных режимов  $0,5 \cdot P_{ном}$ ;  $0,7 \cdot P_{ном}$ ;  $0,8 \cdot P_{ном}$  и  $P_{ном}$  показывают распределение данного параметра в канале обмотки НН фазы В, как наиболее нагреваемой в сравнении с обмотками крайних фаз активной части А и С. Характер этого распределения для режимов 1 и 2 определяется законом степенной функции вида  $Y = X^a$  и в зоне  $\frac{3}{4}$  высоты обмотки (горизонтальная заштрихованная область) нагрев достигает  $T_{max}$ . Выше максимальной зоны нагревания, т.е. на участке верхней  $\frac{1}{4}$  длины канала, фиксируется снижение температуры вследствие охлаждения нескольких верхних витков обмотки за счет теплоотдачи ее торца излучением и конвекцией, а также за счет теплопроводности через опорные детали. Характерным для анализируемых режимов является также разность между максимальным и минимальным превышением температуры в осевом канале обмотки НН, где температурные градиенты достигают следующих значений:  $\Delta\Theta_{max-min.1} = 71^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\Theta_{max-min.2} = 88,7^\circ\text{C}$  (1 и 2 – номер режима по таблице 1).

Теплофизический процесс нагревания активной части КТП мощностью 1250 кВ·А (рисунок 1) исследовался также в двух вариантах ее теплового состояния, но в отличие от КТПВ-1000/6 исследование осуществлялось в двух тепловых режимах в последовательности и по методике, установленной для испытаний на нагрев сухих трансформаторов по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98) – в режиме холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Среднее превышение температуры обмоток НН и ВН для каждого из установившихся тепловых режимов (активная часть в оболочке КТП), определенное по изменению их сопротивления постоянному току, представлено в таблице 2.

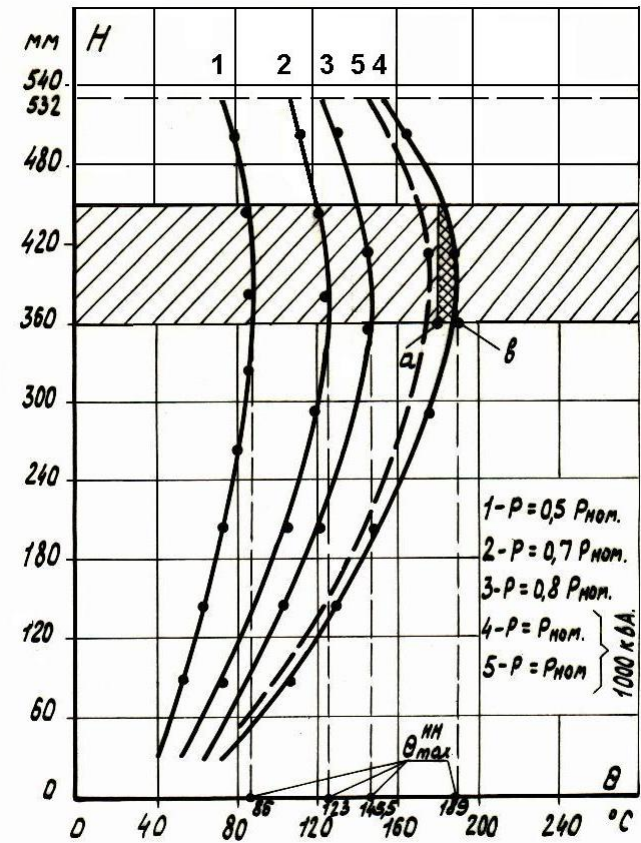
Таблица 2 - Тепловые характеристики КТПВ-1250/6 в режимах нагревания при холостом ходе и коротком замыкании

Режим нагревания продолжительный	Превышение температуры обмоток (по сопротивлению, ГОСТ 3484.2-98) и магнитной системы, °С		
	обмотка НН	обмотка ВН	магнитопровод (верхнее ярмо)
Холостой ход ( $U_{ВН} = 6000 \text{ В}$ )	34,6	29,5	120,5
Короткое замыкание ( $P_{ном} = 1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ )	122,3	146,5	89,2



----- канал НН фазы В, - - - - - канал НН фазы С

Рисунок 2 – Распределение превышения температуры по высоте обмотки НН активной части (без оболочки) в различных режимах нагрузки



----- канал НН фазы В, - - - - - канал НН фазы С

Рисунок 3 – Распределение превышения температуры по высоте обмотки НН активной части в различных режимах нагрузки (в оболочке КТП)

По экспериментально-расчетным данным таблицы 2 согласно ДСТУ 3645-97 было определено среднее превышение температуры обмоток НН и ВН КТПВ-1250/6, соответствующее ее номинальным параметрам, по формуле

$$\Delta\Theta_{обм} = \Delta\Theta''_{обм} [1 + (\Delta\Theta'_{обм} / \Delta\Theta''_{обм})^{1,25}]^{0,8}, \quad (1)$$

где  $\Delta\Theta_{обм}$  – общее превышение температуры по ГОСТ 3484.2-98 каждой из обмоток при номинальных условиях;

$\Delta\Theta'_{обм}$  – среднее превышение температуры каждой из обмоток, определенное в режиме ХХ;

$\Delta\Theta''_{обм}$  – среднее превышение температуры каждой из обмоток, определенное в режиме КЗ.

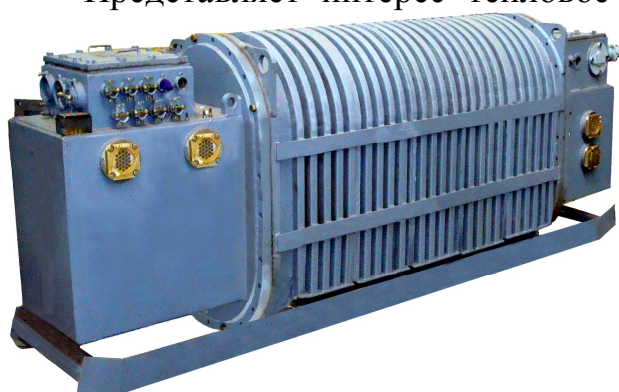


Рисунок 4 – Общий вид трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6

Представляет интерес тепловое состояние еще одного образца трансформатора мощностью 1000 кВ·А в гофрированной оболочке КТП нового поколения типа ТВКП-1000/6 (рисунок 4), конструктивно отличающейся от оболочки с трубами и верхним оребрением (рисунок 1).

Основными критериями оценки влияния оболочки КТП на тепловое состояние ее активной части являются указанные выше тепловые параметры обмоток ВН и НН и

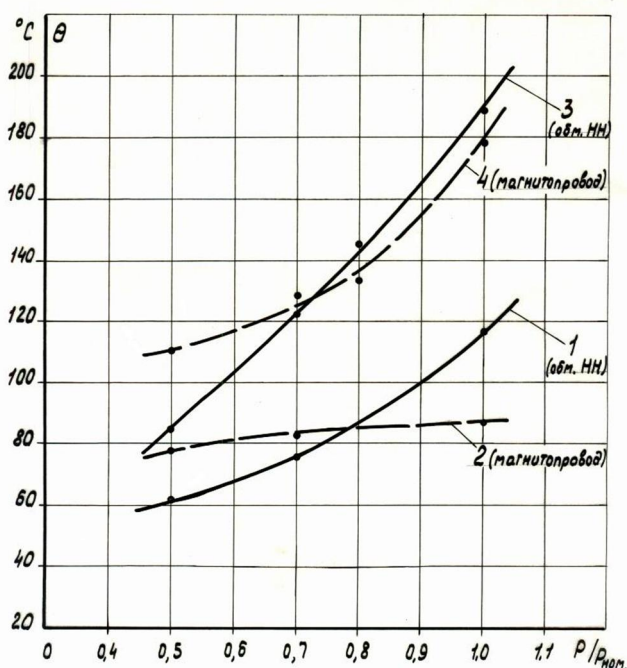
магнитопровода при различных условиях охлаждения в номинальном режиме нагрузки, определенные экспериментально-расчетным путем (таблица 3).

Таблица 3 - Тепловые характеристики рудничных трансформаторных подстанций при различных условиях охлаждения в номинальном режиме нагрузки

Параметр	Превышение температуры, °С					
	КТПВ-1000/6		КТПВ-1250/6*		ТВКП-1000/6*	
	Активная часть без оболочки	Активная часть в оболочке КТП	Активная часть без оболочки	Активная часть в оболочке КТП	Активная часть без оболочки	Активная часть в оболочке КТП
$\Theta_{ННср}$	61	142,4	73,5	149	88,0	151
$\Theta_{ВНср}$	72,9	148,7	85	156	81	155
$\Theta_{ННmax}$	116	199,4	158	218	130	210

- Примечание. Расчетные значения – по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98, МЭК 76-2-93)

Эти данные констатируют существенное различие температурных значений. Для КТПВ-1000/6 разность между средним превышением температуры обмотки НН в оболочке и вне ее достигает  $83,4^{\circ}\text{C}$ ; обмотки ВН –  $75,8^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\theta_{\text{ННmax}} = 83,4^{\circ}\text{C}$ . В качественном отношении также наблюдается заметное отличие тепловых процессов в трансформаторе КТП от теплообменных процессов активной части непосредственно с окружающей средой. На рисунке 5 показаны экспериментальные зависимости максимального превышения температуры обмотки НН и магнитопровода КТПВ-1000/6 от нагрузки для указанных двух этапов исследования. В первом случае (в оболочке КТП) процесс нагревания магнитопровода подчиняется экспоненциальному закону; во втором случае тепловой процесс происходит значительно медленнее с тенденцией к стабилизации теплового состояния магнитной системы. Процесс нагревания обмотки НН происходит с различной скоростью нарастания температуры и значительной разностью ее максимальных значений ( $\Delta\theta_{\text{НН}}^{0,7} = 47^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\theta_{\text{НН}}^{1,0} = 73^{\circ}\text{C}$ ).



1 и 2 – активная часть без оболочки,  
3 и 4 – активная часть в оболочке КТП

Рисунок 5 – Зависимость максимального превышения температуры обмотки НН магнитопровода от нагрузки

Для активной части мощностью  $1250 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  (конструкция оболочки КТП аналогична конструкции КТПВ-1000/6, рисунок 1) влияние оболочки на тепловой режим характеризуется аналогичными сравните-



льными данными по приведенным выше параметрам:  $\Delta\theta_{\text{ННср}} = 69,5^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\theta_{\text{ВНср}} = 71^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{ННmax}} = 218^\circ\text{C}$ .

Для активной части 1000 кВ·А, помещенной в гофрированную оболочку новой конструкции (ТВКП-1000/6), определены следующие приращения температуры в номинальном режиме (таблица 3):  $\Delta\theta_{\text{ННср}} = 61,8^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\theta_{\text{ВНср}} = 74^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\theta_{\text{ННmax}} = 80^\circ\text{C}$ .

### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

1. Взрывонепроницаемая оболочка рудничного трансформатора существенным образом влияет на его тепловые характеристики, ухудшая условия охлаждения и, тем самым, повышая температурный режим обмоток НН и ВН.

2. Средние превышения температуры обмоток КТПВ-1250 и ТВКП-1000, определенные по сопротивлению в соответствии с ГОСТ 3484.2-98 после продолжительного установившегося номинального режима нагрузки, несколько превышают нормируемое значение  $150^\circ\text{C}$ .

3. Сравнительный анализ теплового состояния трансформаторов КТПВ-1000/6 и ТВКП-1000/6 показал, что гофрированная оболочка, как система охлаждения трансформатора типа ТСВ, несколько хуже отводит тепло по сравнению с оболочкой с трубами, но, тем не менее, обе конструкции, принимая во внимание данные по нагреву КТПВ-1250, требуют оптимизации по теплоотдаче их конструкции.

4. Для уточнения экспериментально-расчетных данных теплового состояния трансформаторов КТПВ-1250/6 и ТВКП-1000/6 можно рекомендовать проведение тепловых исследований методом непосредственной или взаимной нагрузки по ГОСТ 3484.2-98 с последующим сравнением данных по методу условной нагрузки.

### **Библиографический список**

1. Анализ и аспекты совершенствования систем охлаждения взрывозащищенных трансформаторов и подстанций / Е.А.Сорока, И.Я.Чернов, В.М. Грушко В.М.[и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2007. – С. 49-70.

2. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов, Н.С. Сещенко. – М.: Энергия, 1984. – 215 с.

3. Тепловые исследования активной части трансформаторной подстанции типа КТП-1250/6-1,2 в различных условиях нагрева и охлаждения / Грушко В.М., Золотарев Е.В., Сорока Е.А.[и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование. - 2006. – С. 64-73.

4. Исследование и сравнительный анализ стационарного температурного поля оболочек трансформаторных подстанций типа КТПВ

*мощностью 1000 и 1250 кВ·А / Сорока Е.А., Золотарев Е.В., Калач Е.Н. [и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование. - 2005. – С. 59-68.*

*5. Сорока Е.А. Экспериментально-теоретическое исследование теплоотдачи оболочки трансформатора взрывозащищенного исполнения / Е.А. Сорока // Электротехника. – 1992. - № 4.*

***Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.***