

# Совершенствование системы охлаждения взрывозащищенных трансформаторов

Дана оценка эффективности различных систем охлаждения, приведено сравнение их конструкции и надежности в целях нормализации теплового режима взрывозащищенных сухих трансформаторов передвижных комплектных подстанций для питания электроприемников угольных шахт.

**Ключевые слова:** трансформатор, подстанция, система охлаждения, оболочка, активная часть, обмотки, превышение температуры.

**Контактная информация:** ukniive@list.ru

**Постановка проблемы.** При проектировании и эксплуатации электрических машин (в том числе силовых трансформаторов) наряду с максимально допустимыми электрическими и механическими напряжениями необходимо соблюдать предельно допустимые ограничения по температуре активных частей. По этой причине общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует процесс совершенствования систем охлаждения.

Система охлаждения трансформатора общего назначения вместе с наружной частью включает и систему внутреннего охлаждения (осевые и радиальные охлаждающие каналы), обеспечивающую передачу теплоты от активной части к теплоносителю (минеральному маслу в масляном трансформаторе, воздуху – в сухом).

Об эффективности работы этих систем можно судить по тепловому состоянию обмоток низшего и высшего напряжений, определяемому по ГОСТ 3484.2–98. Для сухих трансформаторов необходимо также определение местных (максимальных) нагревов, играющих основную роль в старении изоляционной системы. Следовательно, вопросы проектирования систем охлаждения неразрывно связаны с тепловым состоянием активной части трансформатора.

Для трансформатора, представляющего собой в тепловом отношении неоднородное тело, необходимо, чтобы температура его наиболее нагретой, активной части была не выше допустимой, т. е. система охлаждения должна быть рассчитана на отвод теплоты, выделяющейся в трансформаторе во внешнюю среду, и обеспечивать его тепловой режим в соответствии с требованиями ГОСТ 11677–85. Нагрев зависит от потерь энергии и интенсивности охлаждения, т. е. чем интенсивнее охлаждение трансформатора, тем больше допустимые потери энергии и чем больше его номинальная мощность, тем сложнее осуществить охлаждение.

Так, для трансформаторов малой мощности (до 1000 В·А) естественное воздушное охлаждение оказывается достаточным.



**Е. А. СОРОКА,**  
ст. научный сотрудник

Для трансформаторов большой мощности (более 100 кВ·А) применяют специальные меры в целях повышения интенсивности охлаждения (масляное охлаждение, вентиляционные каналы, обдув оболочек и др.). Это объясняется тем, что с повышением мощности трансформатора увеличиваются его линейные размеры, которые возрастают пропорционально корню четвертой степени от мощности ( $l = S^{1/4}$ ). Внешняя, охлаждаемая воздухом, поверхность трансформатора увеличивается пропорционально квадрату линейных размеров:  $F_0 \equiv l^2 \equiv S^{1/2}$ , а удельные потери  $q$  также возрастают в пропорции  $q \equiv \Sigma P / F_0 = S_{\text{мп}}^{1/4}$ .

Таким образом, с увеличением номинальной мощности трансформатора и его размеров потери энергии в нем увеличиваются в большей степени, чем поверхность охлаждения. Чтобы с ростом мощности трансформатора сохранить удельную тепловую нагрузку поверхности оболочки  $q$  и превышение ее температуры над окружающим воздухом  $\theta_{\text{об.в}}$  неизменными, прибегают к увеличению внешней поверхности трансформаторов путем дополнительного оребрения.

Для сухих трансформаторов вопрос интенсификации

охлаждения усложняется по следующим причинам:

1) в них, в отличие от масляных, система наружного охлаждения, как правило, не выделяется в виде отдельных конструктивных единиц;

2) система внутреннего охлаждения, не являясь функционально самостоятельным конструктивным узлом, представляет собой неотъемлемый элемент активной части, а потому при ее проектировании требования в отношении нагрева обмоток и магнитопровода неразрывно связаны с требованиями к электродинамической стойкости обмоток и электрической прочности изоляции;

3) тепловой режим их более напряженный, чем масляных, вследствие того, что воздух как теплоноситель менее совершенная охлаждающая среда, чем трансформаторное масло  $\lambda_{\text{в}} = 0,022 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $0,101 \text{ МПа}$ ,  $\lambda_{\text{тр,м}} = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

4) из-за меньшей теплопроводности воздуха электромагнитные нагрузки активных материалов в трансформаторах меньше, что вызывает увеличение сечения проводов обмотки и магнитопровода;

5) для нормируемого теплового режима сухих трансформаторов при условии не превышения максимальной и средней температуры обмоток над окружающей средой значений, установленных ГОСТ 11677-85 и ГОСТ 8865-93, увеличение наружной поверхности оказывается недостаточным, а идти по пути увеличения охлаждающих поверхностей обмоток и магнитопровода неприемлемо из-за значительного удорожания изделий.

В трансформаторах взрывозащищенного исполнения активная часть помещена во взрывонепроницаемую герметичную оболочку, полностью исключающую доступ в нее наружного воздуха. Вследствие этого их тепловой режим еще более напряженный, чем в трансформаторах общего назначения, что привело к повышению рабочей температуры обмоток и магнитопровода и повлекло за собой необходимость применения дорогостоящей кремнийорганической изоляции классов нагревостойкости Н и 200 (ГОСТ 8865-93 [1]).

Из изложенного следует, что при создании сухих взрывозащищенных трансформаторов и на их основе комплектных трансформаторных подстанций (далее – подстанций) оптималь-

ной конструкции важен правильный выбор и расчет системы охлаждения, так как от нее зависит надежность не только этих изделий, но и угледобывающих комплексов в целом. Поэтому вопросы анализа, исследования и поиска дополнительных резервов при проектировании эффективных систем охлаждения, при которых температура отдельных частей трансформатора не превысит предельно допустимых значений, актуальны.

**Анализ исследований и публикаций.** В отечественной литературе нет специальных работ по вопросам теплообмена, систем охлаждения и повышения эффективности сухих трансформаторов как общего назначения, так и взрывозащищенных.

Первые отечественные трансформаторы для подстанций были с кварцевым заполнением, взрывозащита в аварийном режиме обеспечивалась за счет гашения электрической дуги кварцевым песком. Потери в обмотках отводились к оболочке посредством теплопроводности в большей мере (60–65 %) через алюминиевые теплоотводящие пластины, установленные между обмотками высшего и низшего напряжения, и через кварцевый песок (35–40 %). Охлаждение наружной поверхности оболочки обеспечивалось за счет естественной конвекции воздуха и излучения. На основе опыта производства и эксплуатации подобных подстанций серии ТКШВП, а также в связи с созданием более мощных горных машин была расширена шкала мощностей и освоены трансформаторы и подстанции мощностью 100, 160, 250, 400 и 630 кВ·А типа ТСШВ и ТСШВП.

Установившееся при данной нагрузке превышение температуры трансформатора над температурой окружающей среды  $\theta_{\text{уст}}$  зависит от площади его теплоотдающей поверхности и интенсивности теплоотдачи и выражается зависимостью [2]

$$\theta_{\text{уст}} = P/(\alpha F),$$

где  $P$  – потери в трансформаторе, Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$F$  – площадь теплоотдающей поверхности,  $\text{м}^2$ .

Следовательно, при проектировании трансформатора необходимо обеспечить соответствующую поверхность охлаждения, т. е. вполне определенную рассеивающую поверхность на 1 кВт потерь. Однако потери с ростом мощ-

ности увеличиваются тем быстрее, чем быстрее увеличивается поверхность охлаждения и, начиная с некоторой мощности, эта поверхность оказывается уже недостаточной ( $\theta_{уст} > \theta_{норм}$ ). Поэтому в сухих трансформаторах все охлаждающие каналы системы внутреннего охлаждения приходится делать большими, а электромагнитные нагрузки активных материалов допускать меньшими, чем в масляных. Такой путь для трансформаторов общего назначения ограничивается максимальной мощностью 10 МВ·А, для взрывозащищенных он неприемлем из-за значительно возрастающих габаритных размеров изделий. Поэтому необходимо стремиться к увеличению коэффициента теплоотдачи, что стало предметом экспериментально-теоретического исследования разных систем охлаждения на образце трансформатора ТСШВ-400/6.

В 1990-х годах появился повышенный интерес к применению в различных областях техники испарительно-конденсационных устройств – тепловых труб, что позволило решить проблему эффективности охлаждения и надежного обеспечения требуемых температурных режимов. Принцип действия этих устройств основан на использовании скрытой теплоты парообразования при фазовых превращениях промежуточного теплоносителя. Преимущества тепловых труб – высокая эффективность теплопередачи, компактность, автономность и технологичность, что послужило основанием для применения их в конструкциях трансформаторов типа ТСВ.

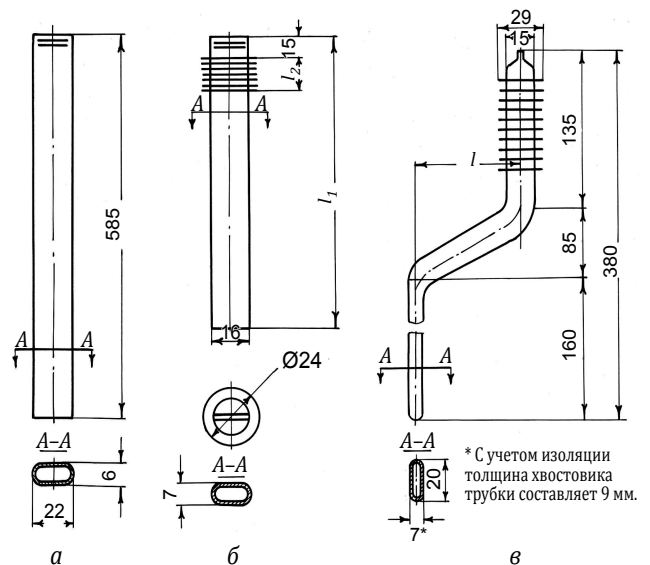
УкрНИИВЭ совместно с Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси впервые в отечественной практике разработали трансформаторы и подстанции мощностью 1000 кВ·А с использованием тепловых труб, отвечающих требованиям эксплуатации в угольной промышленности. Патентный поиск и анализ достижений в области разработки и применения тепловых труб позволил принимать наиболее прогрессивные решения по совершенствованию конструкции систем охлаждения трансформаторов и подстанций [3]. Варианты конструкции тепловых труб, представляющей собой замкнутый цилиндрический испарительный термосифон без капиллярно-пористой структуры, показаны на рис. 1.

**Цель исследований** – сравнительный анализ систем охлаждения взрывозащищенных трансформаторов и подстанций, оценка их эф-

фективности и перспективы практического применения.

**Результаты исследований.** Создание серии взрывозащищенных сухих трансформаторов и подстанций мощностью до 630 кВ·А и пересмотр стандартов ГОСТ 15542–79 и ГОСТ 16837–79 с повышением требований к ним определило необходимость выбора и разработки оптимальных параметров системы охлаждения активной части и оптимальных геометрических соотношений охлаждающих каналов обмоток. В данном случае, *первое направление*, нашла применение система естественного воздушного охлаждения с теплопередачей на оболочку посредством конвективного теплообмена. По мере изучения возможности применения тепловых труб наметилось *второе направление* – создание сухих взрывозащищенных трансформаторов с испарительно-конденсационной системой охлаждения. Оно перспективно при создании подстанций мощностью более 1000 кВ·А, так как из-за стесненного пространства подземных выработок допустимые размеры изделий можно обеспечить при использовании более эффективных систем охлаждения.

*Третье направление* в развитии рудничного трансформаторостроения – работы по созданию сухих взрывозащищенных трансформаторов с принудительным охлаждением, обеспечивающим повышение их номинальной мощности до



**Рис. 1.** Тепловые трубы, установленные: а – в теплообменнике; б – в магнитопроводе; в – в обмотках низкого напряжения.

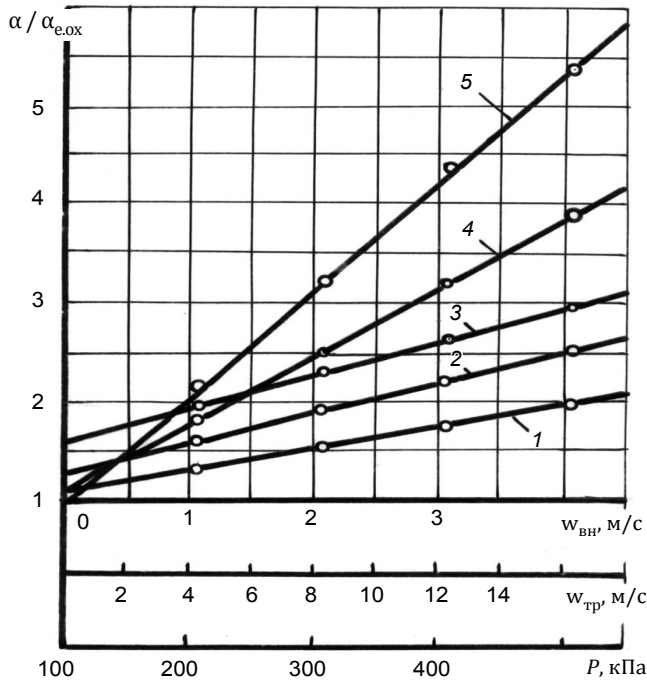


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и  $\alpha_{e,ox}$  от скорости циркуляции воздуха в трубах  $w_{тр}$ , внутри оболочки  $w_{вн}$  и давления  $P$  для разных систем охлаждения: 1 – азот (100 %), естественное охлаждение; 2 – элегаз (50 %) и азот (50 %), естественное охлаждение; 3 – элегаз (100 %), естественное охлаждение; 4 и 5 – принудительный обдув по трубам, внутренний.

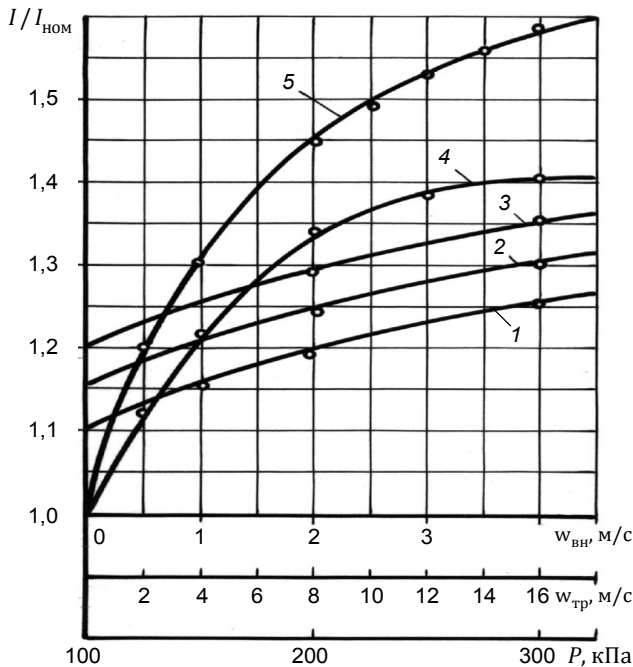


Рис. 3. Зависимость нагрузочной способности  $I / I_{ном}$  трансформатора ТСШВ-400/6 от скорости циркуляции воздуха в трубах  $w_{тр}$ , внутри оболочки  $w_{вн}$  и давления  $P$  для различных систем охлаждения: 1–5 – см. подрисовочную подпись к рис. 2.

1600 кВ·А и выше, а также улучшение на 30–35 % массогабаритных характеристик подстанций серии КТПВ [4].

Патентный поиск по наиболее развитым странам, анализ технической литературы и других источников показали, что применение принудительного воздушного охлаждения – перспективное направление нормализации теплового режима взрывозащищенных трансформаторов повышенной мощности, обеспечивающее снижение их массы и размеров.

Повышение интенсивности охлаждения – это, в сущности, увеличение коэффициента теплоотдачи посредством конвекции от наружных и внутренних поверхностей охлаждения. Так, интенсификация теплоотдачи внутри оболочки возможна при ее заполнении инертными газами (элегазом, азотом) под некоторым избыточным давлением или в случае внутреннего принудительного охлаждения воздухом (например, с помощью разработанной УкрНИИВЭ системы принудительного воздушного охлаждения со встроенными в оболочку трубами).

Для сравнительной оценки различных способов интенсификации теплоотдачи проведены расчеты коэффициента теплоотдачи для трансформатора ТСШВ-400/6 со следующими системами охлаждения:

- естественная конвекция элегаза, азота или смеси элегаза (50 %) с азотом (50 %), заполняющих оболочку при давлении 0,1–0,6 МПа;
- принудительное воздушное охлаждение со встроенными в оболочку трубами;
- внутренний принудительный обдув.

Первые две системы интенсифицируют теплоотдачу внутри оболочки, третья – в окружающую среду. Результаты расчетов приведены на рис. 2. Для сравнения систем охлаждения коэффициент теплоотдачи дан в отношении к коэффициенту теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении  $\alpha_{e,ox}$ . На оси абсцисс для систем принудительного охлаждения внутри оболочки и по трубам отложено значение скорости циркуляции воздуха, для системы с газовым заполнением – избыточное давление.

В зависимости от скорости циркуляции и давления (рис. 2) в рассматриваемых системах коэффициент теплоотдачи увеличивается: при заполнении оболочки элегазом при 0,1 МПа и естественной конвекции – в 1,5 раза, при 0,55 МПа – в 3 раза, при охлаждении трансформатора с по-

мощью труб со скоростью воздуха 18 м/с – в 4 раза, при внутреннем обдуве со скоростью воздуха 4,5 м/с – в 6 раз.

По зависимостям определены длительные допустимые нагрузки (при  $\theta_{обм} = 125\text{ }^\circ\text{C}$ ) для ТСШВ-400/6 (рис. 3) и оценена эффективность систем охлаждения. Наиболее эффективна система принудительного воздушного охлаждения внутри оболочки. При  $w_{воз} = 4,5\text{ м/с}$  длительная токовая нагрузка по сравнению с номинальной может быть увеличена в 1,6 раза. При охлаждении по трубам длительная нагрузка при  $w_{воз} = 18\text{ м/с}$  может быть увеличена в 1,4 раза, при заполнении элегазом и давлении 0,1 МПа – в 1,2 раза.

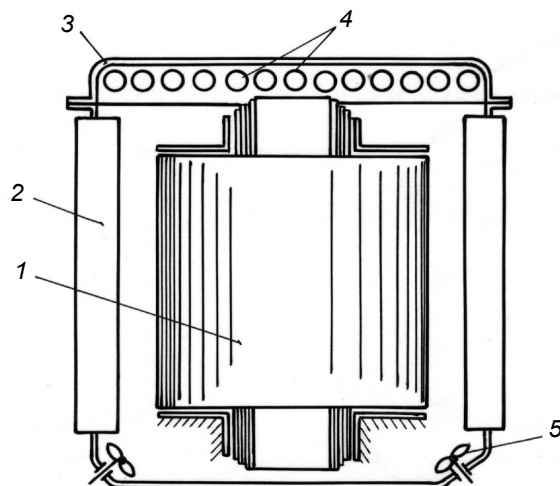
При выборе системы охлаждения необходимо учитывать не только эффективность системы, но и возможность ее реализации в конструкции трансформаторов, а также параметры надежности.

Система охлаждения по трубам менее эффективна по сравнению с системой внутреннего принудительного охлаждения, однако лишена ее недостатка, так как основной тепловой поток от активной части в окружающую среду отводится через трубы, и отпадает необходимость в гофрированной оболочке, что упрощает конструкцию системы.

Система охлаждения с заполнением оболочки сухих взрывозащищенных трансформаторов инертными газами под давлением наименее эффективна из рассмотренных, поскольку сложна в эксплуатации и требует постоянного наблюдения за герметичностью оболочки.

Таким образом, для шахтных сухих трансформаторов наиболее эффективна система двойного принудительного воздушного охлаждения, позволяющая увеличить мощность трансформатора в тех же размерах при неизменном расходе активных материалов приблизительно на 60 %, т. е. на две ступени по шкале мощности, приведенной в ГОСТ 9680–77. Исходя из этого на основе трансформатора мощностью 1000 кВ·А можно разработать трансформатор с принудительным охлаждением мощностью до 1600 кВ·А.

Отметим конструктивные особенности следующих опытных образцов сухих трансформаторов с применением системы принудительного охлаждения: ТСШВД-1000/6 расчетной мощностью 1000 кВ·А (рис. 4), ТКВ-1600/6 (трансформатор кварценополненный мощностью 1600 кВ·А с интенсификацией охлаждения активной

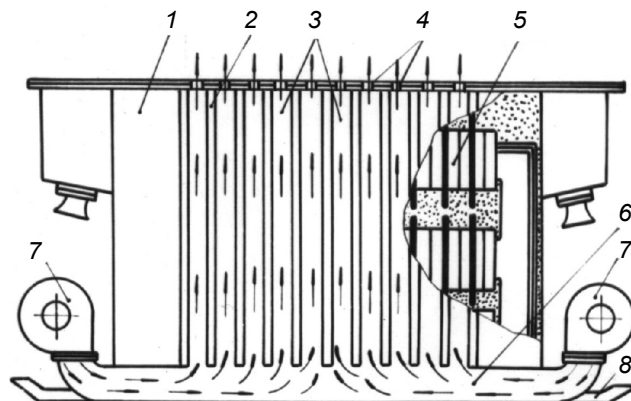


**Рис. 4.** Конструкция системы охлаждения трансформатора типа ТСШВД-1000/6: 1 – активная часть; 2 – гофры; 3 – объемная крышка оболочки; 4 – охлаждающие трубы; 5 – вентилятор.

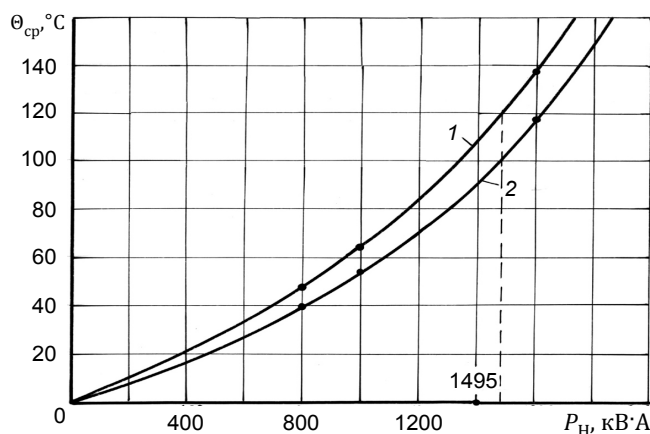
части и оболочки), трансформатор подстанции ТСВПД-400/6 расчетной мощностью 400 кВ·А.

Система охлаждения трансформатора ТСШВД-1000/6 представляет собой оболочку прямоугольной формы со съемной верхней крышкой, в которой над активной частью в зоне наибольшего нагрева расположены в один или несколько рядов охлаждающие трубы ( $d = 50\text{ мм}$ ,  $l = 2400\text{ мм}$ ).

Для увеличения теплоотдачи от активной части к трубам применена принудительная внутренняя вентиляция (в нижней части оболочки установлено шесть центробежных нагнетающих



**Рис. 5.** Конструкция системы охлаждения трансформатора типа ТКВ-1600/6: 1 – оболочка; 2 – гофры; 3 – межферменные охлаждающие каналы; 4 – отверстия в крышке оболочки для выхода наружу тепловых конвективных потоков воздуха; 5 – активная часть; 6 – горизонтальные (продольные) каналы; 7 – вентиляторы; 8 – опорная рама.



**Рис. 6.** Экспериментальная зависимость превышения температуры  $\theta_{ср}$  обмоток трансформатора ТКВ-1600/6 от нагрузки  $P_n$ : 1 и 2 – для обмоток высшего и низшего напряжений. Режим непосредственной нагрузки.

вентиляторов). Внешний нагнетающий вентилятор находится сверху оболочки на коробке выводов низкого напряжения. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность этой системы охлаждения – его фактическая тепловая мощность составила 1090 кВ·А.

Опытный образец взрывозащищенного трансформатора единичной мощностью 1600 кВ·А, приведенный на рис. 5, – первый в отечественной практике трансформатор подобного класса и мощности. Во время разработки главной проблемой был выбор системы охлаждения. В результате проведения комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ изобретены и использованы следующие системы охлаждения:

- для активной части – испарительно-конденсационная система охлаждения с помощью тепловых труб [5];
- для оболочки – система принудительного воздушного охлаждения с помощью двух наружных центробежных вентиляторов, установленных на опорной раме трансформатора [4].

Активная часть ТКВ-1600/6 представляет собой трехстержневой шихтованный магнитопровод с горизонтально расположенными стержнями и дисковыми чередующимися обмотками высшего и низшего напряжений, между катушками которых для отвода потерь в меди к оболочке установлены алюминиевые теплообменники с тепловыми трубами (см. рис. 1).

Свободные концы теплообменников входят в вертикальные гофры оболочки. Тепловые потери активной части благодаря теплообменникам от-

водятся на оболочку, для отвода которых разработан высокоэффективная система воздушного охлаждения с помощью наружных вентиляторов [4].

В качестве воздухопроводов используется полая опорная рама с горизонтальными каналами, по которым воздух подводится снизу к межгоферным каналам оболочки. Двигаясь по ним, воздушный поток равномерно омывает поверхности гофр по их высоте. Равномерное распределение воздуха по каналам обеспечивается встречным включением вентиляторных устройств, благодаря чему создается турбулизация потока и увеличивается коэффициент теплоотдачи оболочки в окружающую среду. Эффективность охлаждения трансформатора (по сравнению с естественным воздушным) возрастает на 30 %, что позволяет снизить температуру трансформатора и уменьшить расход активных материалов. В конструкции трансформатора ТКВ-1600/6 за счет увеличения эффективности охлаждения увеличена плотность тока в обмотках высшего и низшего напряжений (соответственно и удельные тепловые нагрузки), в результате чего его тепловая мощность, определенная по зависимости  $\theta_{ср} = f(P_n)$  для обмотки высшего напряжения, составила 1495 кВ·А, а для обмотки низшего – 1615 кВ·А (рис. 6). Охлаждение кожуха принудительное, воздушное ( $w_{ср.об} = 6...7$  м/с), температуры расчетные. При нагрузке 800 кВ·А превышения температуры составят: для обмотки высшего напряжения 48 °С, для обмотки низшего – 29 °С, при нагрузке 1000 кВ·А – соответственно 64 и 54 °С, при нагрузке 1500 кВ·А – 137 и 117 °С.

Еще один вариант принудительного охлаждения внедрен на образце подстанции типа ТСВПД-400/6 с помощью двух осевых вентиляторов, установленных внутри оболочки трансформатора (рис. 7).

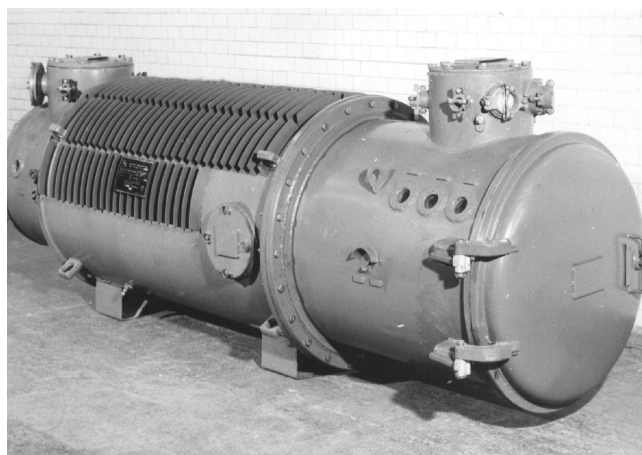
Система охлаждения – это замкнутый контур внутренней принудительной вентиляции. Ее особенность и достоинство – максимальное использование геометрической формы оболочки взрывозащищенного трансформатора и взаимного расположения основных частей внутри нее.

Эффективность охлаждения активной части оценивали сравнением температуры обмоток в идентичных режимах нагрева при включении одного, двух вентиляторов и при их отключении. Применение такого охлаждения изменяет процесс теплоотдачи в оболочке, так как она осуществляется с поверхности обмоток и маг-

нитопровода с помощью вынужденной конвекции. С увеличением скорости циркуляции теплоносителя ( $w_{\text{воз}} = 3 \dots 5$  м/с) значительно возрастает коэффициент теплоотдачи от указанных поверхностей к внутреннему воздуху, в результате повышения температуры которого возрастает и температура обмотки. Тепловые потери активной части более интенсивно отводятся в окружающую среду, а эффективность охлаждения трансформатора возрастает.

Следующим шагом в совершенствовании испарительно-конденсационной системы охлаждения сухих трансформаторов стала разработка системы с применением тепловых труб, установленных непосредственно в активной части. Условия охлаждения обмоток низшего напряжения (многослойных цилиндрических с осевыми каналами) очень неблагоприятные, так как конструктивно они располагаются непосредственно на стержнях магнитопровода внутри обмоток высшего напряжения, а также подогреваются от магнитопровода. Для улучшения эффективности охлаждения предложена система, в которой использованы цилиндрические тепловые трубы, встраиваемые в осевые каналы обмоток [6]. Превышение температуры ее наиболее нагретой точки ( $\frac{3}{4}$  высоты обмотки) – один из главных параметров при определении норм температурного режима трансформатора и непосредственно влияет на его технико-экономические показатели. Снижение этой температуры – резерв дальнейшего увеличения мощности трансформатора, который позволяет снизить расход активных материалов. Это было учтено при разработке новой системы охлаждения [6]: тепловоспринимающие части тепловых труб, выполненные как одно целое с дистанцирующими рейками, расположены на высоте, равной  $\frac{3}{4}$  высоты обмоток.

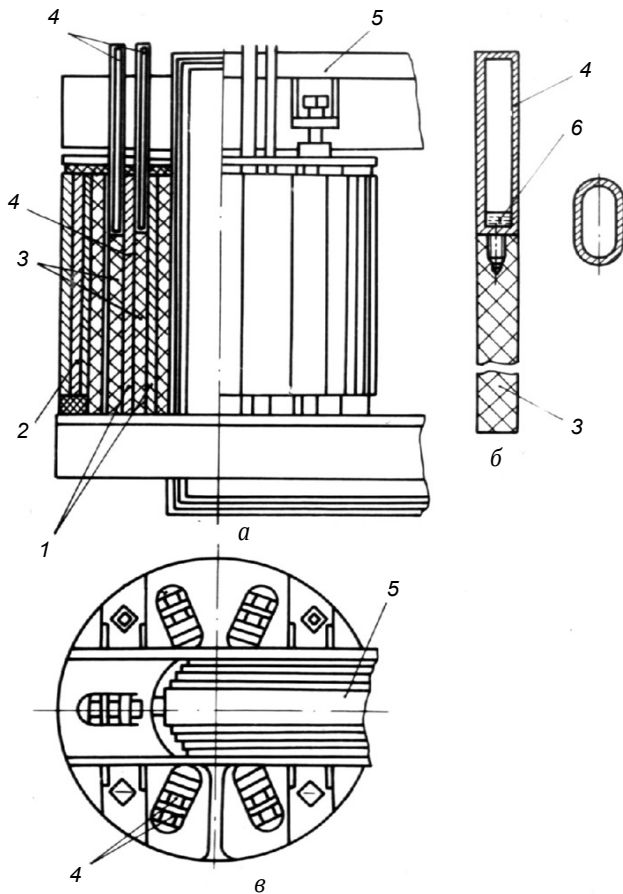
Обмотка одной фазы сухого взрывозащищенного трансформатора с дистанцирующими рейками, совмещенными с тепловыми трубами, показана на рис. 8. Трансформатор содержит магнитопровод, многослойные цилиндрические обмотки низшего напряжения с осевыми каналами, обмотки высшего напряжения, дистанцирующие рейки, установленные в осевых каналах обмоток низшего напряжения. Верхняя часть дистанцирующих реек представляет собой тепловую трубу, залитую рабочей жидкостью. Температура кипения жидкости соответствует рабочей температуре обмоток.



**Рис. 7.** Взрывозащищенная подстанция типа ТСВПД-400/6 с внутренним принудительным воздушным охлаждением.

Установка тепловоспринимающих частей тепловых труб в зоне наибольшего нагрева повышает эффективность их работы, так как при прочих равных условиях увеличивается перепад температуры между зонами испарения и конденсации. Кроме того, снижается перепад между  $\theta_{\text{max}}$  и средней температурой обмоток, уменьшается градиент температуры по их высоте и достигается равномерность охлаждения.

В целях увеличения эффективности охлаждения активной части предложено техническое решение [7], реализация которого достигается встраиванием в стержни и ядро магнитопровода охлаждающих элементов в виде тепловых труб с теплоотводящими частями V-образной формы, жестко скрепленными с оболочкой продольными шинами (рис. 9). В герметичной оболочке помещается активная часть; в стержни и ядро магнитопровода (в каналах) установлены тепловые трубы, заполненные хладагентом (спиртом, ацетоном, водой, фреоном или другими жидкостями с температурой кипения 40–100 °С). Тепловоспринимающие части тепловых труб расположены в зонах наибольшего нагрева системы, а теплоотдающие части V-образной формы с пластинами на концах разветвлены, выступают за пределы активной части и жестко скреплены сборными шинами оболочки. Разветвленные теплоотводящие части труб значительно увеличивают зону конденсации паров хладагента и интенсифицируют процесс теплоотдачи, а их V-образная форма обеспечивает надежный тепловой контакт тепловых труб с оболочкой.



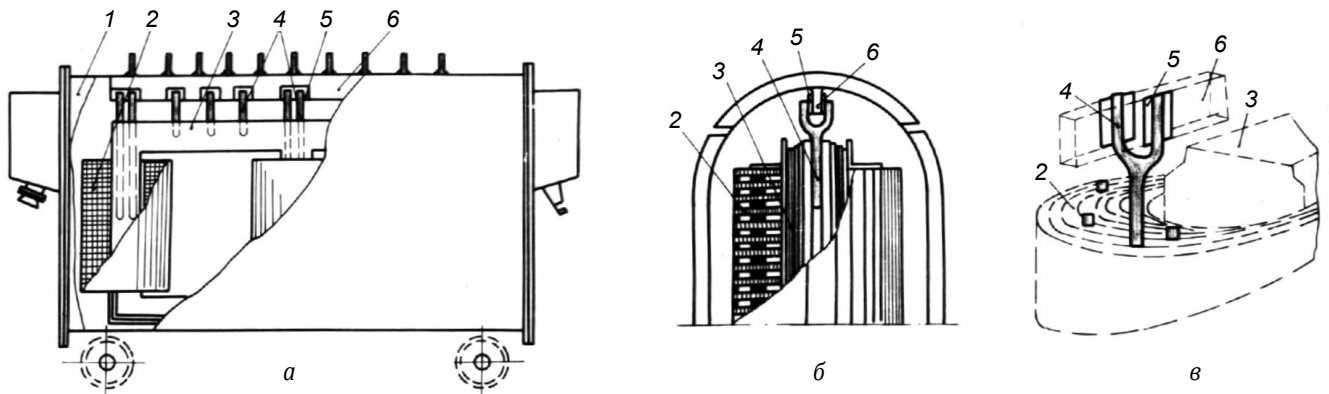
**Рис. 8.** Система охлаждения с тепловыми трубами, совмещенными с рейками обмоток низшего напряжения: *а* – установка реек с тепловыми трубами в осевых каналах цилиндрических обмоток низшего напряжения; *б* – дистанцирующая рейка, выполненная совместно с тепловыми трубами; *в* – обмотка фазы трансформатора (вид сверху); 1 и 2 – обмотки низшего и высшего напряжения; 3 – дистанцирующие рейки; 4 – верхняя часть дистанцирующих реек; 5 – магнитопровод; 6 – тепловая труба, залитая рабочей жидкостью.

Для определения эффективности системы были проведены тепловые исследования экспериментального образца трансформатора с изоляцией класса нагревостойкости Н, разработанного на базе серийного 2ТСВ-400/6 и удовлетворяющего требованиям ГОСТ 15542-79.

Охлаждение осуществляется двумя способами: естественным воздушным и испарительно-конденсационной системой. В качестве элементов последней использованы тепловые трубы (см. рис. 1), теплоносителем в которых является дистиллированная вода. Для увеличения теплоотдачи тепловые трубы установлены в осевые каналы равномерно по окружности (33 ед.), их верхние части оребрены и обдуваются внутренним воздухом за счет конвекции, а теплопринимающие части расположены на высоте  $\frac{3}{4}$  обмотки низшего напряжения и имеют с ней хороший тепловой контакт.

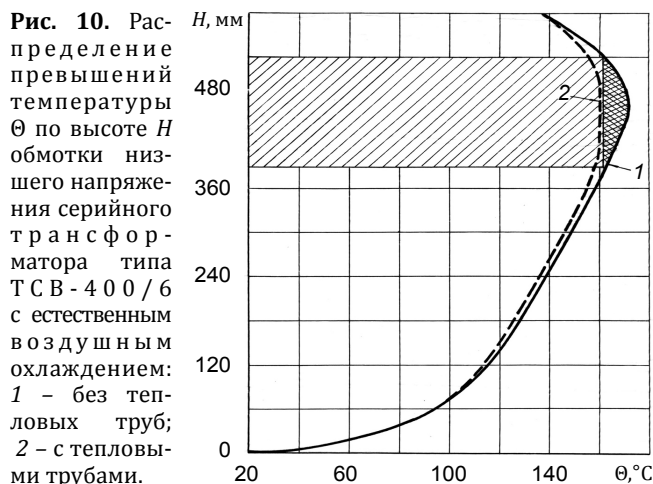
По результатам исследований получено распределение превышения температуры по высоте обмотки низшего напряжения. В температурной зоне обмотки в интервале от 400 до 500 мм при естественном охлаждении (без тепловых труб)  $\theta_{\max} > 162^\circ\text{C}$ , что превышает нормированное значение для максимально нагретой точки. Применение тепловых труб снижает температуру в этой зоне на 10–15 °С, при этом она не превышает нормированного значения, т. е. устраняется вероятность ускоренного старения изоляции (рис. 10).

Для сухих трансформаторов мощностью до 630 кВ·А включительно благодаря модернизации оребренно-гофрированной взрывонепроницаемой оболочки как системы охлаждения, тем-



**Рис. 9.** Система охлаждения активной части трансформатора с тепловыми трубами V-образной формы: *а* – частичный разрез трансформатора (вид сбоку); *б* – поперечный разрез; *в* – активная часть со встроенными V-образными тепловыми трубами: 1 – герметичная оболочка; 2 – активная часть; 3 – магнитопровод; 4 – тепловая труба; 5 – пластины; 6 – оболочка.





**Рис. 11.** Общий вид трансформатора типа ТСВ-630/6.

пература которой является функцией потерь, выделяемых активной частью, было достигнуто увеличение коэффициента теплоотдачи ее внешней поверхности до  $\alpha_{\text{м,гоф}} = 28 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  и  $\alpha_{\text{м,реб}} = 29,5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , что больше соответствующих значений коэффициента теплоотдачи в вертикальных каналах оболочки овального профиля в 2,64 и 1,89 раза [8]. Образец трансформатора ТСВ-630/6 с усовершенствованной по теплоотдаче оболочкой (с наклонными гофрами), являющегося основной сборочной единицей комплектных подстанций типа КТПВ-630/6, показан на рис. 11.

Первостепенное значение при расчете температурных полей, и вообще в тепловых расчетах, имеет коэффициент теплоотдачи. В общем случае он зависит от геометрической формы и размеров поверхности теплообмена (оболочки), скорости движения среды в охлаждающих каналах, температурных условий и т. д.

Повысить коэффициент теплоотдачи теплоотдающих поверхностей оболочки – значит увеличить интенсивность охлаждения трансформатора. Поэтому при исследованиях теплового состояния наряду с изучением нагревания их

активных частей значительное внимание уделяется изучению теплового поля оболочек в целях оптимизации по теплоотдаче их конструкции [9]. Экспериментальные данные о влиянии оболочки как элемента системы охлаждения трансформатора на максимальное и среднее превышение температуры обмоток низшего (НН) и высшего (ВВ) напряжений комплектных подстанций мощностью 1000 и 1250 кВ·А типов КТПВ-1000/6 и КТПВ-1250/6 приведены в таблице.

Для интенсификации охлаждения трансформаторов мощностью 1000 и 1250 кВ·А применена система охлаждения с трубами [10], установленными вертикально с боковых сторон оболочки в плоскостях, параллельных ее продольной оси. Как показал анализ, среднее превышение температуры обмоток высшего напряжения практически равно предельному значению 150 °С, а максимальная температура обмотки низшего напряжения превышает нормируемую по ГОСТ 8865-93. В повторно-кратковременном режиме работы при ПВ = 60 % превышение температуры КТПВ-1000/6 составляет:  $\theta_{\text{ВНср}} = 112,6 \text{ °C}$ ;  $\theta_{\text{ННmax}} = 154 \text{ °C}$ . Изложенное указывает на не-

Объект исследования	Продолжительный режим нагревания при мощности, кВ·А	КТПВ-1000/6, °C			КТПВ-1250/6*, °C		
		$\theta_{\text{ННср}}$	$\theta_{\text{ВНср}}$	$\theta_{\text{ННmax}}$	$\theta_{\text{ННср}}$	$\theta_{\text{ВНср}}$	$\theta_{\text{ННmax}}$
Активная часть без оболочки	1000	61	72,9	116	–	–	–
	1250	–	–	–	73,5	85	158
Активная часть в оболочке	1000	144,4	149,8	213	–	–	–
	1250	–	–	–	149	166	266

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

обходимость совершенствования системы естественного охлаждения с трубами.

**Выводы.** Анализ эффективности разных систем охлаждения, сравнение их конструкции и надежности свидетельствует, что принудительное воздушное охлаждение – перспективное направление нормализации теплового режима взрывозащищенных трансформаторов и комплектных подстанций повышенной мощности.

Исследования процессов нагревания и охлаждения, проведенные на экспериментальных образцах сухих трансформаторов разной мощности, свидетельствуют о том, что применение системы с горизонтальными трубами и внутреннего перемешивания воздуха дает возможность увеличить мощность трансформатора в прежних габаритных размерах и при неизменном расходе активных материалов в 1,6 раза, т. е. на две ступени по шкале мощности ГОСТ 15542-79. Мощность нагнетательных элементов системы – 2,3 кВт, что составляет 0,23 % номинальной (расчетной) мощности 1000 кВ·А трансформатора сухого защищенного.

Применение принудительной системы воздушного охлаждения подстанции ТСВПД-400/6 позволит:

- снизить максимальное превышение температуры обмотки по сравнению с естественным воздушным охлаждением на 15–20 °С;
- достигнуть соответствия фактической тепловой мощности изделия расчетной мощности 400 кВ·А;
- снизить расход активных и конструкционных материалов (масса по сравнению с 2ТСВП-400/6 снижена на 900 кг).

Разработана высокоэффективная испарительно-конденсационная система охлаждения с применением тепловых труб, позволившая повысить эффективность охлаждения сухих трансформаторов, в результате: снижается максимальная температура элементов активной части; уменьшаются температурные перепады  $\Delta\theta_{\text{обм}}$ ; понижается как среднее превышение температуры обмоток, так и разность между максимальным и средним превышением температуры низшего напряжения.

Совершенствование системы охлаждения трансформаторов с вертикальными трубами требует дополнительного исследования тепловых параметров охлаждающего агента в конструкции оболочки ( $w, q, \alpha$ ) для последующей ее

оптимизации (определение оптимального диаметра труб и их количества).

При выборе системы охлаждения необходимо наряду с эффективностью учитывать и возможность ее реализации в конструкции трансформатора сухого взрывозащищенного, а также параметры надежности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Энергоснабжение* высокопроизводительных угледобывающих комплексов / И. Я. Чернов, Л. Б. Ландкоф, В. В. Шилов [и др.] // Уголь Украины. – 2002. – № 9. – С. 21–23.
2. *Голунов А. М.* Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А. М. Голунов, Н. С. Сещенко. – М.: Энергия, 1984. – 215 с.
3. *Интенсификация* охлаждения взрывобезопасных трансформаторов на основе применения тепловых труб / Э. П. Михайленко, Е. В. Стельмах, Н. В. Баранецкий [и др.] // Трансформаторы, комплектные подстанции, реакторы: обзор информ. Сер. 03. – Вып. 1 (4). – М.: Информэлектро, 1988. – 24 с.
4. А. с. 684623 СССР, МКИ Н 01 F 27/08. Взрывобезопасный трансформатор / А. А. Гусев, Э. П. Михайленко, А. И. Плетнев, Е. В. Стельмах, Е. А. Сорока, Н. И. Каськова, В. Н. Колчак (СССР). – № 2542701/24-07; заявл. 14.11.77; опубл. 05.09.79, Бюл. № 33.
5. А. с. 714521 СССР, МКИ Н 01F 27/18; Н 01 F 27/22. Устройство для отвода тепла / А. И. Кубрак, А. И. Плетнев, Н. П. Степанищев, В. Н. Колчак и др. (СССР). – № 2158847/24-07; заявл. 23.07.75; опубл. 05.02.80, Бюл. № 5.
6. А. с. 760207 СССР, МКИ Н 01 F 27/18. Сухой трансформатор / А. А. Гусев, А. И. Кубрак, Э. П. Михайленко, А. И. Плетнев, Е. В. Стельмах, Е. А. Сорока и др. (СССР). – № 2611231/2407; заявл. 03.05.78; опубл. 30.08.80, Бюл. № 32.
7. А. с. 920862 СССР, МКИ Н 01 F 27/08. Взрывобезопасный трансформатор / Н. В. Баранецкий, И. А. Горбань, А. А. Гусев, Э. П. Михайленко, А. И. Плетнев, Е. В. Стельмах, Е. А. Сорока (СССР). – № 2933396/24-07; заявл. 30.05.80; опубл. 15.04.82, Бюл. № 14.
8. *Сорока Е. А.* Совершенствование оболочки рудничных взрывозащищенных трансформаторов и трансформаторных подстанций мощностью 400 и 630 кВ·А / Е. А. Сорока // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 1998. – С. 147–160.
9. *Сорока Е. А.* Исследование и сравнительный анализ стационарного температурного поля оболочек трансформаторных подстанций типа КТПВ мощностью 1000 и 1250 кВ·А / Е. А. Сорока, Е. В. Золотарев, Е. Н. Калач, Г. Л. Локтионов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, Лтд, 2005. – С. 59–68.
10. А. с. 1403114 СССР, МКИ Н 01 F 27/08. Взрывонепроницаемая оболочка для рудничных сухих трансформаторов / А. И. Плетнев, М. А. Нагорный, В. М. Грушко, В. Н. Колчак и др. – № 4000178/24-07; заявл. 02.01.86; опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.