

УДК 62-712.3

А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева

ОСАЖДЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ

Ключевые слова: трансформатор, радиатор, охлаждение, распыл капель.

Для обеспечения высокой эффективности охлаждения масла в силовых трансформаторах широко используются вентиляторы обдува пучков труб. Показано, что дополнительная система ввода жидкости на трубы радиатора позволит улучшить охлаждение трансформатора. Представлены результаты осаждения капель жидкости на рядах труб охладителя. Применение дополнительной системы охлаждения трубных пучков дутьем и вводом капель жидкости позволит добиться достижения допустимой температуры верхних слоев масла.

Keywords: transformer, radiator, cooling, spray droplets.

Fans blowing tube bundles are widely used to ensure high efficiency of the cooling oil in power transformers. It is shown that the additional liquid injection system to the radiator pipe will improve the cooling of the transformer. The results of the deposition of liquid droplets in the ranks of the coolant pipes presents. The use of an additional tube bundles cooling system blowing and putting liquid drops would lead to achieving the permissible temperature of the upper layers of oil.

Силовые трансформаторы являются наиболее дорогостоящими элементами в системе электроснабжения, поэтому при нынешней существенной недогрузке трансформаторов государство несет значительные финансовые издержки. Максимальная нагрузка трансформаторов на предприятиях, определяемая отношением получасового максимума нагрузки к номинальной мощности трансформатора, редко превышает 60%. Это значит, что на каждый кВА передаваемой мощности при получасовом максимуме нагрузки устанавливают 1,5–3 кВА трансформаторной мощности. Данная ситуация, в частности, обусловлена тем, что за длительную историю эксплуатации масляных трансформаторов тепловые процессы в них так до конца и не изучены. И, прежде всего, потому, что технически сложно измерить температуру обмотки, провод которой находится под высоким напряжением [1]. Большая часть трансформаторов имеет срок эксплуатации свыше 30 лет, при этом предельный срок оценивается в 45 лет. Эксплуатация трансформаторов после 30 лет без принятия специальных мер сопряжена с повышенными рисками отказов оборудования, замена которого в короткий промежуток времени технически невозможна и дорогостояща [2, 3]. Так, например, эксплуатация трансформаторов в жаркий период времени года нередко сопровождается случаями их перегрева из-за нарушений в работе системы охлаждения [4]. Данная проблема в результате приводит к экономическим потерям вследствие не полной возможной нагрузки на трансформатор или к аварийным ситуациям, пожарам, разливу масла.

Целью настоящей работы является исследование процесса охлаждения силовых масляных трансформаторов. Поскольку в процессе интенсивной работы происходит существенный нагрев и износ деталей трансформатора, а охладить его элементы в процессе работы до требуемых температур стандартными способами не всегда

удается, предлагается равномерное распределение охлаждающей жидкости на поверхность трубных пучков радиатора.

В трансформаторах применяют навесные радиаторы с трубами круглой формы. Такой радиатор состоит из N рядов труб, собранных с помощью коробок размером $a \times b \times h$, которые вварены в верхние и нижние коллекторы, присоединяемые патрубками к стенке бака. Также к стенке бака на кронштейнах прикреплены вентиляторы, охлаждающие воздухом сбоку коробку радиатора, увеличивая при этом теплоотдачу [5].

По данным [6] максимальная теплоотдача радиатора получается при установке вентилятора несколько ниже середины высоты радиатора, т.к. вентилятор забирает воздух снизу и направляет его вверх, при этом обдувая верхнюю, наиболее нагретую часть труб. Дополнительное охлаждение обеспечивается путем впрыскивания жидкости на поверхность первого ряда труб, при этом поток воздуха, подаваемый вентилятором, распределяет образующиеся капли по остальным рядам труб. Распыленная жидкость, поступая на трубы радиатора, непрерывно омывает поверхность, таким образом, осуществляется процесс теплообмена между жидкостью и поверхностью цилиндрической стенки трубы, жидкость испаряется.

Поскольку вентиляторы охлаждения работают непостоянно, а включаются в работу автоматически от интеллектуального блока управления в зависимости от температуры масла в баке, то жидкость подается на пучки труб периодически, что требует исследования процесса теплообмена с окружающей средой [7].

Исследования проводились для упрощенной модели системы охлаждения трансформатора. Радиатор состоит из 10 рядов труб длиной 1000 мм, изготовленных из стали и меди. В каждом ряду находится по 10 труб. Размеры коробки варьировались в диапазоне: a от 417 до 670 мм, b от

415 до 745 мм в зависимости от изменяемых диаметра и шага труб в ходе эксперимента, $h = 1000$ мм. Охлаждающая жидкость впрыскивалась на радиатор через специальную линию подачи на высоте 400 мм. Диаметр образующихся капель жидкости d изменялся от 10 до 100 мкм. В ходе исследований на каждой поверхности i -ого ряда труб был зафиксирован массовый расход охлаждающей жидкости G_i . Понятно, что наиболее интенсивно омываются жидкостью ряды труб, близко расположенные к линии подачи охлаждающего агента. Для визуализации результатов исследования на графиках представлено изменение отношения массового расхода охлаждающей жидкости на i -ом ряду труб к полному массовому расходу впрыскиваемой жидкости по рядам труб (рис. 1–4). Отсчет рядов труб начинается с первого, расположенного напротив крыльчатки вентилятора для обдува воздухом. В ходе каждого исследования изменялся один из следующих параметров: диаметр капель, диаметр и шаг труб, начальная скорость капель, а остальные – приравнивались базовому значению. Базовые значения: диаметр частиц 30 мкм, начальная скорость капель 15 м/с, шаг между трубами 30 мм, диаметр труб 25 мм. Также задавались некоторые постоянные параметры, а именно: на выходе из трансформатора атмосферное давление 10^5 Па; массовый расход капель жидкости $G = 50$ г/с (0,05 кг/с); начальная скорость частиц 0 м/с; температура воздуха 273,15 К.

Результаты показали, что использование различных насадок для прямолинейного распыления капель охлаждающей жидкости диаметром 10–100 мкм существенно не влияет на эффективность охлаждения рядов труб при прочих равных базовых условиях (рис. 1). На первом ряду труб оседает примерно 50% образующихся капель, остальные оседают на трубах последующих рядов.

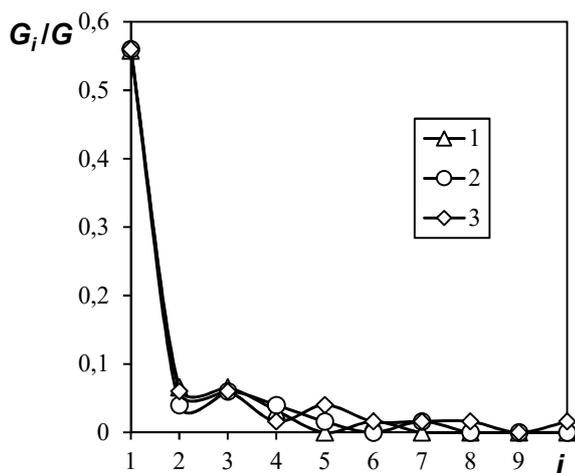


Рис. 1 – Изменение отношения G_i/G по рядам труб при диаметре капель, мкм: 1 – 10, 2 – 30, 3 – 100

При высоких значениях начальной скорости движения капель вероятность оседания их на близлежащие трубы увеличивается. Так при скорости 25

м/с капли воды оседают преимущественно на трубы в первых 4 рядах, а далее пролетают до тыльной стенки трансформатора, не задерживаясь на трубах (рис. 2). При этом теплоотдача будет больше по сравнению со стандартной системой охлаждения трансформатора дутьем. Однако не стоит забывать, что при некачественной системе изоляции трансформатора, возможно попадание влаги и влажного воздуха внутрь оборудования, вызывающие его повреждение.

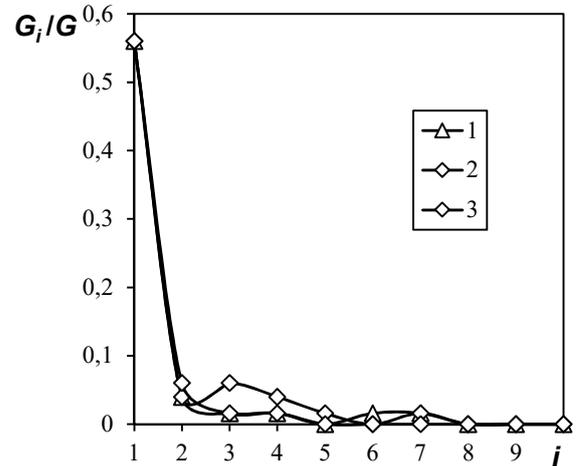


Рис. 2 – Изменение отношения G_i/G по рядам труб при начальной скорости капель, м/с: 1 – 5, 2 – 15, 3 – 25

Увеличение шага между трубами способствует более равномерному орошению каждого ряда труб. Однако чрезмерное увеличение шага может привести к тому, что вся впрыскиваемая жидкость вообще не оседает на трубы, оказавшись на стенке бака трансформатора. При расстоянии между труб 15 мм на стенке бака оказывается 2% от распыленной жидкости, а при расстоянии между труб 45 мм капли после восьмого ряда не срываются (рис. 3).

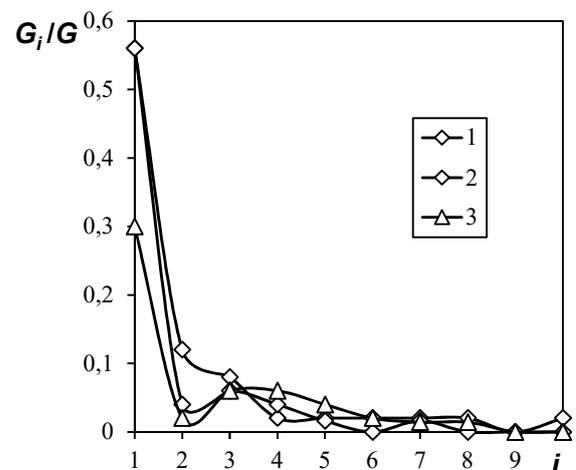


Рис. 3 – Изменение отношения G_i/G по рядам труб при шаге труб, мм: 1 – 15, 2 – 30, 3 – 45

В ходе исследований установлено, что увеличение диаметра труб приводит к интенсивному осаждению капель жидкости на первых рядах труб.

Однако после второго ряда труб происходит обратный процесс. Во всех случаях менее 1% капель окажется на стенке бака трансформатора (рис. 4). Тепловой поток, передаваемый путем теплопередачи от масла в трубах к воздуху, увеличивается при работе вентиляторов обдува с впрыском капель жидкости.

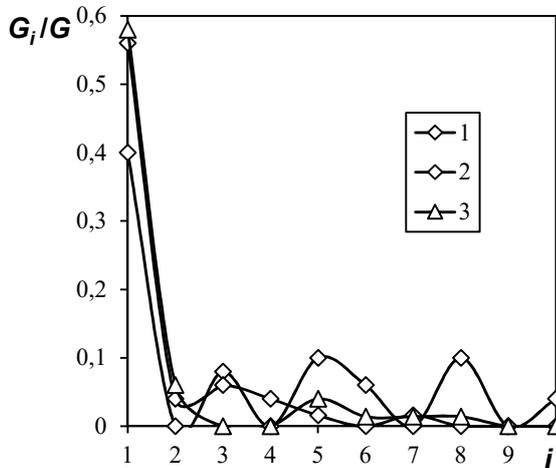


Рис. 4 – Изменение отношения G_i/G по рядам труб при диаметре труб, мм: 1 – 20, 2 – 25, 3 – 32

Таким образом, исследования показали, что оптимальными конструкционными параметрами при охлаждении масляного трансформатора является изготовление радиатора с диаметром труб 32 мм и с шагом 15 мм. В изготовлении отдельной насадки для линии подачи охлаждающей жидкости нет необходимости, так как диаметр частиц в диапазоне

10-100 мкм дает приблизительно один и тот же эффект. Использовать высокую начальную скорость частиц не рекомендуется, наиболее оптимальной является 5–15 м/с. Применение дополнительной системы охлаждения трубных пучков дутьем и вводом капель жидкости позволит добиться достижения допустимой температуры верхних слоев масла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8.

Литература

1. Д.И. Зализный, *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*, 3-4 (6), 51-60 (2001).
2. В.С. Ларин, *Электричество*, 8, 20-26 (2015).
3. М.Г. Bashirov, M.R. Minlibayev, A.S. Hismatullin, *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*, 2, 358-367 (2014).
4. А.В. Дмитриев, Г.Х. Гумерова, О.С. Дмитриева, С.М. Халиуллин, *Вестник технологического университета*, 19, 23, 38-39 (2016).
5. Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, Л.Г. Мамиконянц, И.Н. Дулькин, В.В. Соколов, М.Ю. Львов, Л.Н. Шифрин, *Электричество*, 1, 10-17 (2007).
6. А.М. Голунов. *Охлаждающие устройства масляных трансформаторов*. Энергия, Москва, 1964. 152 с.
7. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, *Вестник технологического университета*, 19, 23, 43-44 (2016).

© А. В. Дмитриев – зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, В. Э. Зинуров – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru, О. С. Дмитриева – доцент кафедры ПАХТ НХТИ (филиала) ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru.

© A. V. Dmitriev – the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, V. E. Zinurov – student, KSPEU, vadd_93@mail.ru, O. S. Dmitrieva – assistant professor of PACHT, NCHTI KNRTU, ja_deva@mail.ru.