

логия. – 2-6т. 16, №1. – С. 83-85.

3. Мовчан В.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме. – Киев, Наукова думка, 1983. – 232 с.

4. Москаленко А.А., Зотов Е.Н., Добри-вечер В.В., Надтока В.Н., Хямялайнен Л.Т. Экспериментально-расчетное определение поля температур полого цилиндра при локальном

внутреннем обогреве. Сборник докладов конференции «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение», Москва, 24-26 марта 2007г. – М.: ОИВТ РАН, «Шанс», 2008. – С.99-105.

5. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB. Методическое пособие. – С-Петербург.: ГУ ИТМО, 2006. – 86с.

УДК 532.542:536.252/255:621.314.212

**Круковский П.Г., Яцевский В.А., Хуторный В.М.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В МИНИКАНАЛАХ ОБМОТОК СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

От точности расчётов теплового состояния силовых высоковольтных трансформаторов больших мощностей, выполненных в процессе разработки, в значительной степени зависят их технико-экономические показатели, надёжность, качество и конкурентоспособность [1]. Существующие инженерные методы расчёта систем охлаждения трансформаторов не удовлетворяют современным, постоянно растущим запросам промышленности как по точности, так и по диапазонам режимных и конструктивных параметров продукции.

Улучшение технико-экономических параметров и конкурентоспособности силовых маслонаполненных трансформаторов на мировом рынке возможно за счёт повышения их удельных нагрузок и коэффициентов заполнения обмоток, что можно осуществить путём максимального уменьшения и оптимизации размеров охлаждающих каналов, в частности высоты горизонтальных межкатушечных каналов. Поэтому с целью экономии материалов и энергоресурсов производители пытаются выпускать как можно более компактные образцы трансформаторов, что приводит к применению так называемых миниканалов высотой порядка 3 мм и меньше, а также комбинации каналов различной высоты. Важным обстоятельством, требующим учёта при детальном расчётах локальных перегревов, является то, что величина тепловыделений (потерь электрической энергии) в отдельных проводниках по радиальному размеру катушек может значительно (в несколько раз) отличаться в

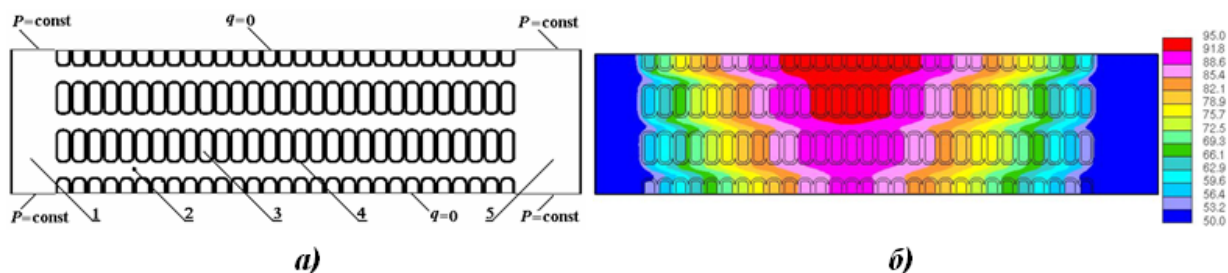
силу неравномерного распределения радиальной и осевой составляющих индукции магнитного поля, которые вызывают соответствующие вихревые токи и дополнительные потери в проводниках. Детальное исследование гидродинамики и теплообмена в таких миниканалах сегодня можно реализовать посредством расчётов с помощью дву- и трёхмерных CFD-моделей в сопряжённой постановке.

При экспериментальном определении температуры масла термомпарами, устанавливаемыми в разных точках по сечению масляных каналов, получаются изменяющиеся (колеблющиеся) значения температуры даже при установившемся (стационарном) режиме. Это объясняется тем, что наиболее нагретые слои масла находятся очень близко к поверхности обмотки, а места их отрыва случайны. В экспериментах также было обнаружено, что направление движения поперечных потоков масла в горизонтальных каналах в исследованных физических моделях было случайным и менялось от одной серии измерений к другой после охлаждения и повторного нагрева масла. Это говорит о квазистационарном (стохастическом) характере термогидравлических процессов в силовом трансформаторе при естественной системе охлаждения (типа М и Д).

В работе исследовалась компьютерная CFD-модель, представляющая собой фрагмент обмотки высшего напряжения силового масляного трансформатора рис. 1, состоящая из нескольких катушек, помещённых в бак с маслом. Геометрическая модель представляет собой осе-

симметричный сегмент цилиндра рис. 1,а с соответствующими внутренним и внешним диаметрами, внутренним и наружным вертикальными охлаждающими каналами. Высота горизонтальных охлаждающих каналов варьировалась в диапазоне  $h = 2,4 \dots 3,6$  мм.

Двумерная сопряжённая задача теплообме-



**Рис. 1. Фрагмент компьютерной микромодели обмотки (а) и её температурное поле (б): 1 – внутренний вертикальный канал; 2 – межкатушечный горизонтальный канал; 3 – провод; 4 – изоляция провода; 5 – наружный вертикальный канал.**

При задании граничных условий в области проводниковых и изоляционных материалов компоненты скорости принимались равными нулю, на границе между несжимаемой жидкостью и твёрдыми материалами задавались тепловые граничные условия сопряжения.

На границе входа и выхода масла задавались условия свободного входа-выхода. Полная система уравнений Навье-Стокса, уравнение сохранения энергии в масле и уравнения теплопроводности в области проводниковых и изоляционных материалов решались с помощью неявного конечно-объёмного метода.

При равномерном тепловыделении по радиусу катушек анализ полученных полей показывает симметричную картину движения масла в обмотке с постепенным увеличением глубины проникновения масла к центру катушек, максимальная интенсивность которого достигается в верхних катушках, где образуется течение, аналогичное течению при образовании классических ячеек Релея - Бенара.

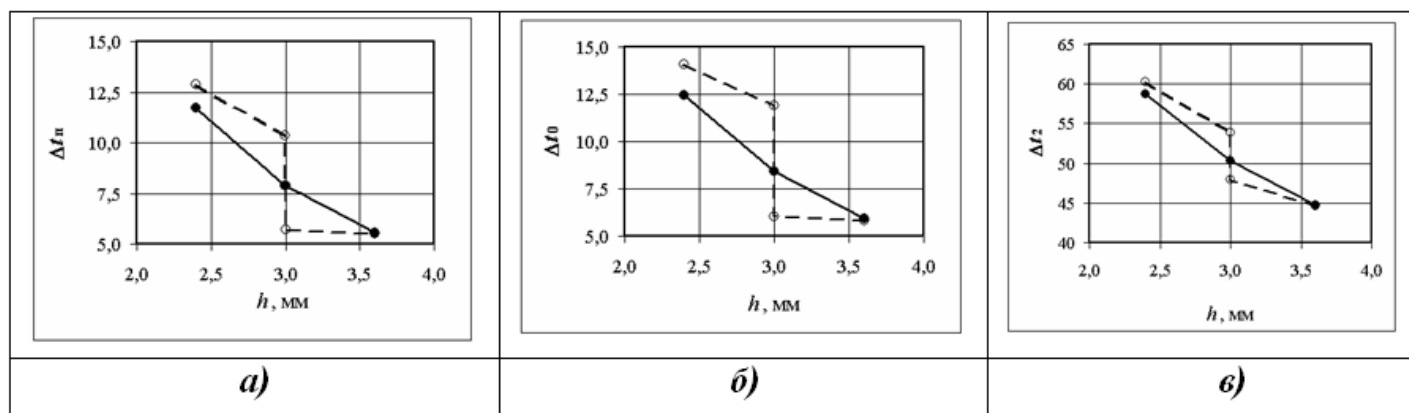
С ростом высоты горизонтального канала падает как максимальная температура, так и объём, занимаемый наиболее нагретой частью трансформаторного масла. Это обусловлено существенным увеличением циркуляции масла и теплообмена в межкатушечном пространстве с ростом высоты горизонтального канала. С увеличением высоты горизонтального канала, наблюдается также увеличение общего уровня ско-

на группы катушек рассматриваемой обмотки с маслом при естественной конвекции решалась в осесимметричной постановке, т. е. предполагалось, что в направлении тангенциального угла  $\varphi$  цилиндрической системы координат зависимые переменные (поля температур, скоростей, давлений) не изменяются.

ростей движения масла, что свидетельствует об увеличении расхода (а соответственно и средней скорости движения). Наблюдается также более глубокое проникновение движущегося масла к центру горизонтального канала, что также свидетельствует об улучшении циркуляции масла в канале с ростом его высоты. С точки зрения теплообмена это является положительным фактором, так как верхние катушки обмотки всегда более нагреты, и именно их охлаждению при проектировании следует уделять особое внимание.

В результате расчётов получены превышения средней температуры поверхности групп катушек обмотки и объёма рассматриваемой части обмотки над средней температурой масла в баке и температурой охлаждающей среды от высоты горизонтальных каналов охлаждения рис. 2. Эти зависимости имеют непрерывный характер (снижение величин с ростом высоты канала), что естественно для протекающих в каналах теплогидравлических процессов.

В существующих инженерных полуэмпирических методиках расчёта теплового состояния силовых трансформаторов при высоте межкатушечного горизонтального канала меньше 3 мм вводится эмпирический коэффициент застойной зоны, который учитывает локальное отсутствие (уменьшение) теплопередачи в центральной области горизонтального межкатушечного канала.



**Рис. 2.** Зависимость превышения средней температуры – поверхности обмотки  $\Delta t_n$  (а), средней температуры объёма обмотки  $\Delta t_0$  над средней температурой масла в баке (б) и превышения средней температуры обмотки  $\Delta t_2$  (в) над температурой охлаждающей среды от высоты горизонтального канала охлаждения  $h$ . Сплошные кривые – CFD-модель, пунктирные – методика на основе работы [2].

Зависимости, полученные с помощью существующей инженерной методики, имеют разрыв для высоты канала равного 3,0 мм, что обусловлено спецификой расчёта с модификацией и разветвлением алгоритма для различных диапазонов высоты горизонтальных межкатушечных каналов и введением в них так называемого коэффициента застойной зоны для высот канала менее 3,0 мм. Поэтому результаты, полученные с помощью CFD-модели для высоты канала в областях, близких к 3,0 мм, являются более точными по сравнению с полученными по эмпирической инженерной методике.

### Выводы

Анализ гидродинамики обтекания и теплообмена фрагментов трансформатора при естественной конвекции можно проводить с помощью CFD-технологий без введения упрощений о характере и схеме течения, свойственных традиционным методикам, что позволяет выполнять более детальное и точное проектирование и оптимизацию параметров систем охлаждения трансформаторов.

Из результатов CFD-моделирования могут быть получены качественные и количественные результаты, описывающие эффективность охлаждения отдельных катушек при уменьшении высоты межкатушечных горизонтальных каналов до значений, вызывающих практическое прекращение циркуляции трансформаторного масла в межкатушечном канале.

Зависимости для превышения средней температуры поверхности обмотки и объёма об-

мотки над средней температурой масла в баке и температурой охлаждающей среды для группы катушек от высоты горизонтального канала охлаждения (2,4; 3,0 и 3,6 мм) имеют непрерывный характер (снижение величин с ростом высоты канала), что естественно для протекающих в таких каналах теплогидравлических процессов. В тоже время зависимости, полученные, с помощью инженерной полуэмпирической методики имеют разрыв для высоты канала 3,0 мм, что обусловлено наличием в них так называемого коэффициента застойной зоны для высот канала менее 3,0 мм. Таким образом, результаты, полученные с помощью CFD-модели для высоты канала 3,0 мм являются более физическими и потенциально более точными по сравнению с существующей инженерной полуэмпирической методикой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России. Часть 1 // Электричество. – 2000. – № 8. – С. 2-10;
2. Mikhailovsky Y.A., Shvidler A.B., Tarle G.E., Tchernogotsky V.M., Voevodin I.D., Lyblin I.Sh. Methods of temperature rise calculations of power transformer windings // CIGRE. International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Paris 29th August – 6th September, 1984, Report Nr. P.2-16.