

УДК 532.542:536.252/255:621.314.212

КРУКОВСКИЙ П.Г.<sup>1</sup>, ЯЦЕВСКИЙ В.А.<sup>1</sup>, КОНТОРОВИЧ Л.Н.<sup>2</sup>,  
ИВАНКОВ В.Ф.<sup>2</sup>, ХУТОРНЫЙ В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт технической теплофизики НАН Украины*

<sup>2</sup> *ОАО "Запорожтрансформатор"*

## CFD – АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРАХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ КАНАЛОВ

Проведено аналіз і порівняння локальних і середніх коефіцієнтів тепловіддачі в горизонтальних каналах охолодження котушкових обмоток силових трансформаторів з їх критичною висотою (~ 3 мм) в умовах природної конвекції трансформаторного масла. Результати отримано за допомогою розроблених CFD - моделей в спряженій постановці.

Проведен анализ и сравнение локальных и средних коэффициентов теплоотдачи в горизонтальных каналах охлаждения катушечных обмоток силовых трансформаторов с их критической высотой (~ 3 мм) в условиях естественной конвекции трансформаторного масла. Результаты получены с помощью разработанных CFD - моделей в сопряжённой постановке.

The analysis and comparison of local and average coefficients heat transfer for horizontal channels of cooling of bobbin windings of power transformers is presented at critical height (~3 mm) in the conditions of natural convection transformer oil. Results are obtained with developed CFD - models as a conjugate problem set.

$b$  – радиальная ширина обмотки;

$b_{вн}$  – ширина внутреннего охлаждающего канала;

$b_{н}$  – ширина наружного охлаждающего канала;

$h$  – высота горизонтального межкатушечного канала;

$T_{ср}$  – средняя температура в баке;

$\Delta t_m$  – превышение средней температуры масла в баке над температурой охлаждающей среды;

$\Delta t'_m$  – превышение средней температуры верхних слоёв масла над ТОС;

$\Delta t_n$  – превышение средней температуры поверхности обмотки над средней температурой масла в баке;

$\Delta t_0$  – превышение средней температуры обмотки над СТМБ всех групп катушек;

$\Delta t_2$  – превышение средней температуры обмотки над ТОС;

$\Delta t_3$  – превышение температуры ННТ обмотки над ТОС;

$\delta_n$  – удвоенная толщина изоляции провода;

$\delta_{мп}$  – удвоенная толщина масляной прослойки;

$\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности изоляции провода;

ННТ – наиболее нагретая точка;

CFD – Computational Fluid Dynamic;

СО – система охлаждения;

СТМБ – средняя температура масла в баке;

ТОС – температура окружающей среды;

ЭТЦ – метод эквивалентных тепловых цепей.

### Индексы нижние:

вн – внутренний;

и – изоляция;

м – масло;

мп – масляная прослойка;

н – наружный;

п – поверхность;

ср – средний.

### **Введение**

Дальнейшее совершенствование силового маслонаполненного трансформаторного оборудования обусловлено необходимостью снижения потерь электроэнергии (нагрузочных потерь) при её передаче и преобразовании, а также постоянно растущими требованиями к уменьшению вкладываемых активных материалов, обеспечению оптимальных технико-экономических показателей и конкурентоспособности на мировом рынке [1-13]. Эти задачи решаются применением новых современных материалов (новых улучшенных марок трансформаторной стали, проводниковых и изоляционных материалов), нового прогрессивного оборудования и технологий, а также новых оригинальных конструкторских решений. Как правило, силовые трансформаторы имеют сложную комбинированную электрическую изоляцию, состоящую из твёрдой части – целлюлозной изоляции и жидкой – минерального или синтетического трансформаторного масла. Именно распределением локальной температуры в области целлюлозной изоляции определяется надёжность функционирования и срок службы силовых масляных трансформаторов. Поэтому при проработке вариантов технических решений исключительно большое значение имеет достоверная информация о тепловом состоянии в различных режимах работы активной части трансформатора, что, в свою очередь, обусловлено определяющей проблемой термостойкости (тепловым старением и деструкцией) маслобумажной изоляции. Эта информация позволяет произвести осознанный выбор вариантов конструкции обмоток, оптимальных размеров каналов охлаждения, а также определение типа и необходимых параметров системы внешнего охлаждения трансформаторного масла.

Повышение технико-экономических параметров силовых трансформаторов возможно за счёт повышения удельных нагрузок и повышения коэффициента заполнения обмоток, что возможно за счёт уменьшения и оптимизации размеров охлаждающих каналов, в частности высоты горизонтальных каналов.

Основной массив экспериментальных данных по влиянию высоты горизонтальных каналов охлаждения катушечных обмоток относится к диапазону 3...10 (иногда 12) мм. Опубликованы также предостережения МЭК о возможности применения ка-

налов с размерами меньше 3 мм [14] при лабиринтном движении масла в связи с возможностью локальных перегревов. В то же время имеются обоснованные соображения и стремление конструкторов снизить высоту радиальных каналов до значений, удовлетворяющим нормам электрической, механической прочности и остальным конструктивным требованиям. Поэтому размеры (высота) горизонтальных межкатушечных каналов в окрестности  $h \leq 3$  мм определяются как критические (см. далее табл. 2).

Условия и особенности теплообмена между тепловыделяющими обмотками силового трансформатора и циркулирующим трансформаторным маслом зависят от достаточно большого количества геометрических и режимных параметров, а именно: от вида обмотки (катушечная или цилиндрическая), соотношения линейных размеров катушек и охлаждающих вертикальных и горизонтальных каналов, вида, материала и толщины изоляции проводов, размеров образованных изоляционными цилиндрами вертикальных каналов, локального распределения тепловыделения в объёме обмоток и других активных и/или металлических частей, температуры и вида циркуляции масла, скорости поступления масла в бак при вынужденной циркуляции, скорости масла в каналах у обмоток при направленной циркуляции масла.

В данной работе рассматривается тепловое состояние группы катушек для системы охлаждения при естественной циркуляции масла в баке (система М) и свободно-конвективном движении воздуха у поверхностей внешних радиаторов, или естественной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха (система Д).

При экспериментальном измерении температуры масла термомпарами, устанавливаемыми в разных точках по сечению масляных каналов у выхода обмотки [13], получают изменяющиеся значения температуры даже при стационарном режиме. Это объясняется тем, что наиболее нагретые слои масла находятся очень близко к поверхности обмотки, а места их отрыва случайны. В экспериментах было также обнаружено, что направление движения поперечных потоков масла в горизонтальных каналах в исследованных моделях было случайным и менялось от одной серии измерений к другой после охлаждения масла.

Теплопередача к маслу от размещённых в нём катушечных обмоток силовых трансформаторов представляет собой весьма сложный комплекс взаимосвязанных нелинейных теплофизических и гидродинамических процессов, возможность надёжного и детального расчёта и анализа которых появилась лишь с развитием современных инструментов моделирования – CFD-технологий [15-18], т.е. с комплексным внедрением методов вычислительной гидродинамики и теплообмена в научные исследования и инженерные расчёты.

Целью работы является исследование с помощью разработанных ранее компьютерных CFD-моделей особенностей теплового состояния группы катушек обмотки силового масляного трансформатора (в сопряжённой постановке) с естественной системой охлаждения при варьировании высоты горизонтальных охлаждающих каналов в области 3 мм, которая вызывает интерес разработчиков в связи с желанием минимизировать габариты оборудования. Необходимо также произвести сравнение полученных данных с результатами расчётов по традиционным инженерным методикам.

### **Современные проблемы расчёта теплового состояния катушечных обмоток с системами охлаждения $M$ и $D$**

Большинство опубликованных и используемых в повседневной практике конструкторских бюро методов расчёта позволяют надёжно и с достаточно высокой точностью определить только средние превышения температуры обмоток силовых трансформаторов [1-13] над средней температурой масла в баке.

*Эмпирический метод «перегревов»*, представленный в работе [13], основан на большом массиве экспериментальных исследований теплообмена в модельных и натуральных катушечных и цилиндрических обмотках и является в настоящее время одним из основных методов оценки теплового состояния обмоток [2]. В качестве входных данных задаются геометрические параметры трансформатора, коэффициенты теплопроводности отдельных элементов (межслоевой изоляции, изоляции проводов, изоляционных цилиндров), а также такие тепловые характеристики как средняя температура масла в баке, превышение средней температуры масла в баке

и температуры верхних слоёв масла над температурой окружающей среды. Эти тепловые данные получаются из отдельного балансового расчёта всей системы, включающей как сам трансформатор, так и внешние теплообменники для охлаждения масла, циркулирующего в системе. Результаты представляются в виде совокупности эмпирических степенных зависимостей превышения средней температуры поверхности обмотки (катушки) над средней температурой масла в баке от ряда режимных и геометрических параметров: плотности теплового потока для рассматриваемой обмотки (катушки), отношения радиальной ширины обмотки к высоте горизонтального канала между катушками для катушечных обмоток, ширины внутреннего и наружного вертикальных охлаждающих каналов, средней температуры масла в баке и средней скорости принудительного движения масла через бак для наружных обмоток при системах охлаждения ДЦ и Ц. Расчёт выполняется для нескольких характерных зон (блоков катушек) трансформатора. Для обмотки (или отдельных групп катушек) рассчитывается превышение средней температуры поверхности и объёма обмотки над средней температурой масла в баке трансформатора, превышение средней температуры обмотки и наиболее нагретой точки (ННТ) над температурой охлаждающей среды. Однако применимость данного метода ограничивается изученным диапазоном основных режимных и геометрических факторов. Получение новых результатов, расширяющих диапазон применения и уточняющих методики методами физического моделирования, в настоящее время требует значительных временных, финансовых (изготовление моделей, испытания) и трудовых затрат, поэтому этот метод далее в настоящее время почти не развивается.

В меньшей степени ограниченный эмпирическими данными является *расчётный метод «перегревов»* [8]. Метод базируется на описании основных физических закономерностей гидродинамики и теплообмена при естественной и вынужденной (смешанной) конвекции жидкости (трансформаторного масла) в вертикальных каналах обмоток с помощью универсальных безразмерных критериальных соотношений, в котором только коэффициенты, зависящие от типа и размеров обмоток, определяются на основании специальных опытных данных. Однако этот метод также упрощённо опреде-

ляет значение температуры наиболее нагретой точки, так как базовым расчётным элементом является обобщённая модель катушки с усреднёнными потерями по всем проводникам. В то же время известно, что величина потерь в отдельных проводниках по радиальному размеру катушки может значительно отличаться, в силу неравномерного распределения радиальной и осевой составляющей индукции магнитного поля, вызывающих соответствующие дополнительные потери в проводниках. Ограничением в применении метода является также ограниченный диапазон эмпирических данных по типам и размерам обмоток.

При разработке методов теплового и гидравлического расчёта трансформаторов и реакторов в ряде случаев используются *методы эквивалентных теплогидравлических цепей* (ЭТЦ) (термогидравлических схем замещения) [19-20]. При их использовании сложные многомерные области в сплошных средах, описываемые системами дифференциальных уравнений в частных производных, заменяют нульмерными тепловыми и гидравлическими цепями с сосредоточёнными тепловыми и гидравлическими проводимостями, тепловыми ёмкостями [19]. Эти цепи описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые в конечном виде для стационарных задач заменяются системой алгебраических уравнений. Применение таких схем существенно упрощает процедуру термогидравлических расчётов, но необходимость использования в них эмпирических, не всегда надёжных и точных данных по коэффициентам местных гидравлических сопротивлений содержит в себе потенциальные ошибки расчёта перепада давлений и расходов в каналах внешнего и внутреннего контуров.

Расчёт процессов гидродинамики и теплообмена охлаждающего масла в сложной конструкции современных силовых трансформаторов обычно производится в два этапа. На первом этапе рассчитывается гидравлическая часть трансформатора с целью определения расходов масла через внешний контур охлаждения и обмотки во внутреннем контуре трансформатора. Как правило, на этом этапе используют так называемые схемы замещения внешнего контура трансформатора для определения расхода масла [20]. На втором этапе по рассчитанным расходам и температурам внутри бака, в

обмотках происходит расчёт перегревов отдельных катушек трансформатора [19]. Оба эти этапа носят приближённый характер, определяют расчётные величины как усреднённые по достаточно большим неоднородным по физическим свойствам областям.

### **Основная характеристика расчёта теплового состояния катушечных обмоток эмпирическим методом «перегревов»**

При расчёте по методике [13] в качестве независимых переменных (входных данных в процедуру расчёта) выступают поверхностная плотность теплового потока  $q$ , средняя температура масла в баке  $T_{cp}$ , и геометрические размеры – ширина внутреннего  $b_{вн}$  и наружного вертикального охлаждающего канала  $b_{н}$ , радиальная ширина обмотки (катушки)  $b$  и высота горизонтального охлаждающего канала  $h$ .

Например, для превышения средней температуры поверхности обмотки (катушки) над средней температурой масла в баке эта зависимость следующая

$$\Delta t_{п} = 1,502q^{0,6} T_{cp}^{-0,3} \left(\frac{b}{h}\right)^{0,25} b_{вн}^{-0,26} b_{н}^{-0,21},$$

а для превышения средней температуры объёма обмотки (катушки) над средней температурой масла в баке

$$\Delta t_{0} = \Delta t_{п} + q \cdot 10^{-3} \left( \frac{\delta_{и}}{2\lambda_{и}} + \frac{\delta_{мп}}{0,22} \right),$$

где второе слагаемое даёт вклад перепада температур в изоляции провода (с учётом толщины масляной прослойки для транспонированных проводов  $\delta_{мп}$ ).

Входящая в приведённые формулы средняя температура масла в баке  $T_{cp}$  определяется из отдельного теплового расчёта системы охлаждения трансформатора. Поэтому для корректного сравнения данных расчёта по CFD - модели (моделируем только часть трансформатора, а именно группу катушек) средняя температура масла в баке при расчёте по методу «перегревов» принималась равной усреднённой температуре масла в CFD - модели.

Что касается расчёта превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей среды, то при её расчёте появляется ещё один внешний по отношению к методике [13] параметр, передаваемый из теплового расчёта внешней системы охлаждения трансформатора  $\Delta t'_m$  – превышение средней температуры верхних слоёв масла над температурой охлаждающей среды. Поэтому для корректного сравнения данных расчёта по CFD - модели превышение температуры верхних слоёв масла над температурой охлаждающей среды при расчёте по методу «перегревов» также принималось равной величине, определённой в CFD - модели.

$$\Delta t_3 = \Delta t_0 + 0,0478 \cdot q^{0,6} t^{-0,3} \left( \frac{b}{h} \right)^{0,67} + \Delta t'_m.$$

### **Результаты CFD – моделирования и их сравнение с данными, полученными по методике работы [13]**

В данной работе исследовалась компьютерная CFD - модель, представляющая собой фрагмент обмотки высшего напряжения силового масляного трансформатора, состоящая из 3 катушек, помещённых в бак (рис. 1). Геометрическая модель фрагмента трансформатора представляет собой

осесимметричный сегмент цилиндра с соответствующими внутренним и внешним диаметрами, внутренним (шириной  $b_{вн} = 8$  мм) и наружным ( $b_n = 11,5$  мм) вертикальными охлаждающими каналами. Высота горизонтальных охлаждающих каналов варьировалась в диапазоне  $h = 2,4 \dots 3,6$  мм. Двумерная сопряжённая задача теплообмена 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. При задании граничных условий в области проводниковых и изоляционных материалов компоненты скорости принимались равными нулю.

На границе входа и выхода масла задавались условия свободного входа-выхода. Тепловыделение в проводах отдельной катушки составляло 33 Вт на катушку. На всех твёрдых поверхностях, контактирующих с маслом, заданы условия прилипания, т.е. равенство нулю скорости. Полная система уравнений Навье-Стокса решалась с помощью неявного конечно-объёмного метода. Остальные особенности компьютерного моделирования изложены в предыдущих работах авторов [17,18].

Результаты CFD – моделирования приведены в табл. 1 и рис. 1,2.

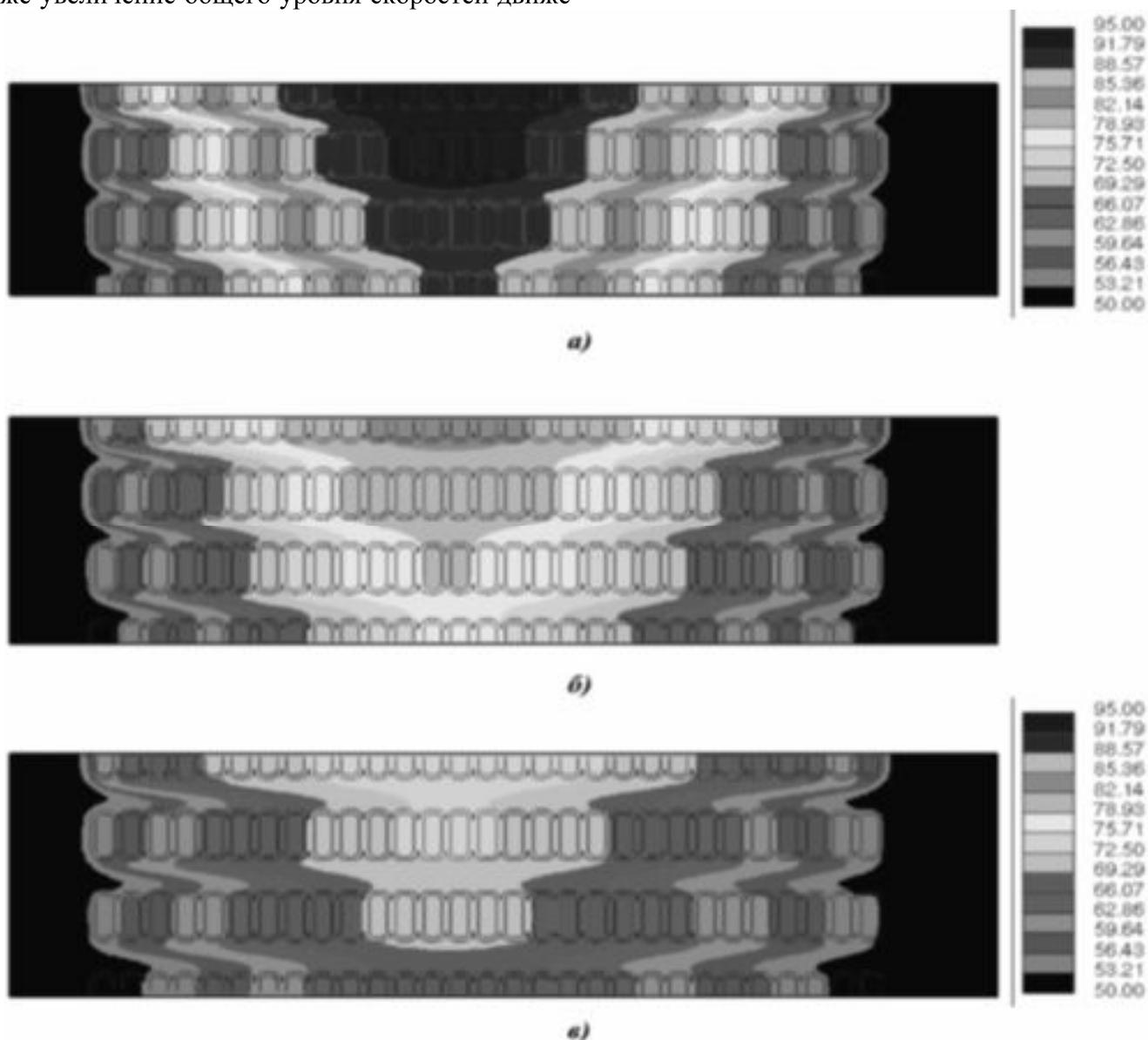
Табл. 1. Результаты моделирования теплового состояния группы катушек

ПАРАМЕТРЫ	Высота межкатушечного канала, мм		
	2,4	3,0	3,6
Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	76,24	76,05	76,04
Средняя температура масла в модели, °С	66,25	61,9	58,81
Превышение средней температуры поверхности обмотки над средней температурой масла в модели	11,73	7,88	5,56
Превышение средней температуры обмотки над средней температурой масла в модели (СТМБ) всех групп катушек	12,47	8,4	5,95
Превышение средней температуры обмотки над температурой охлаждающей среды (ТОС)	58,72	50,3	44,76
Превышение температуры наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки над температурой охлаждающей среды (ТОС)	74,45	62,95	54,35
Суммарный расход масла в модели $\times 10^{-5}$ , кг/с	0,262	0,264	0,265

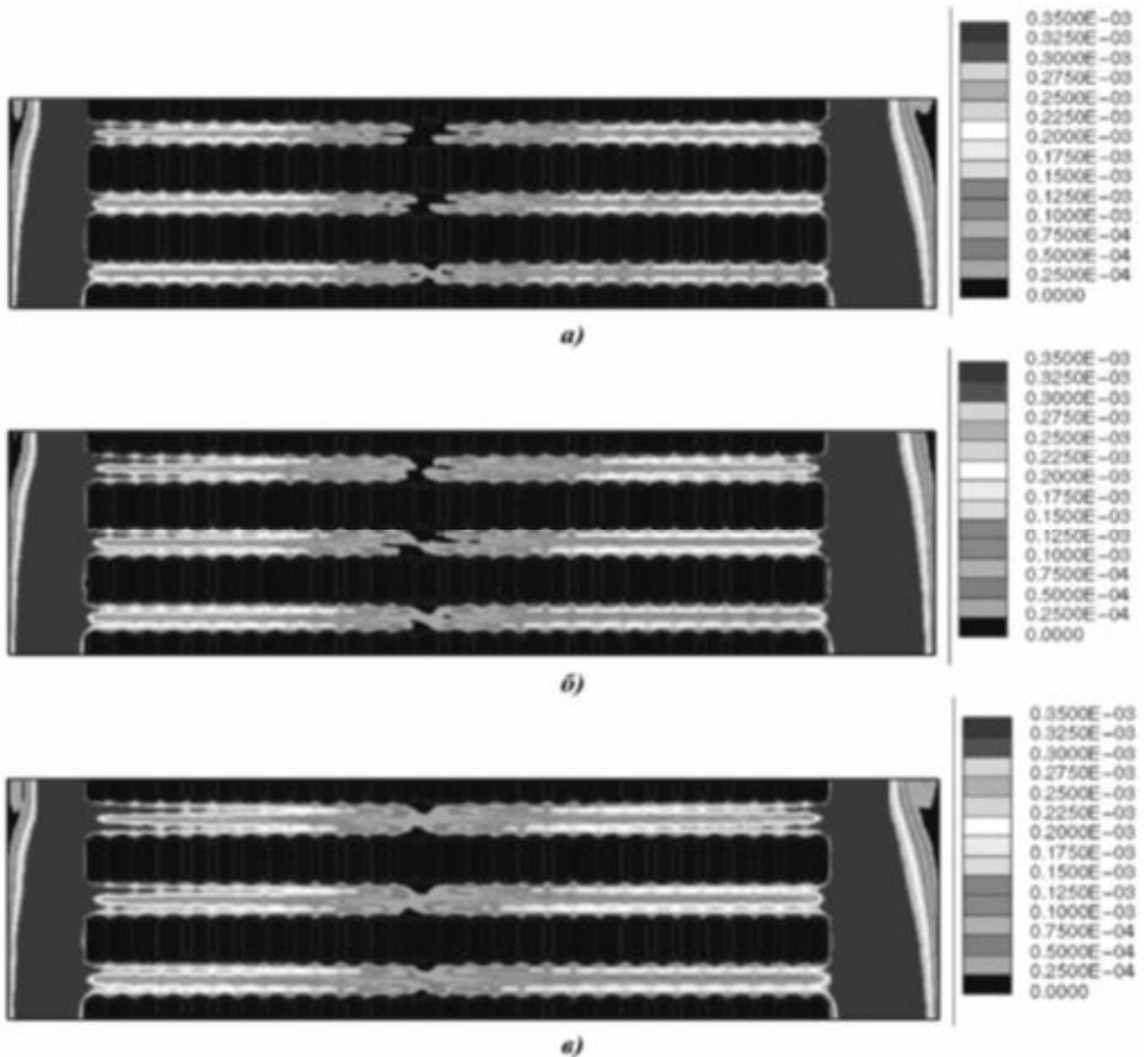
На рис. 1 показаны распределения температур обмоточных проводов и масла в межкатушечном пространстве для различной высоты горизонтального канала 2,4 мм, 3,0 мм и 3,6 мм.

Как видно из рис. 1, 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 скоростей движе-

ния масла (рис. 2), 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 относительно более нагреты, и именно их охлаждению следует уделять особое внимание, так как в них и происходит наибольший перегрев опасный для целлюлозной изоляции.



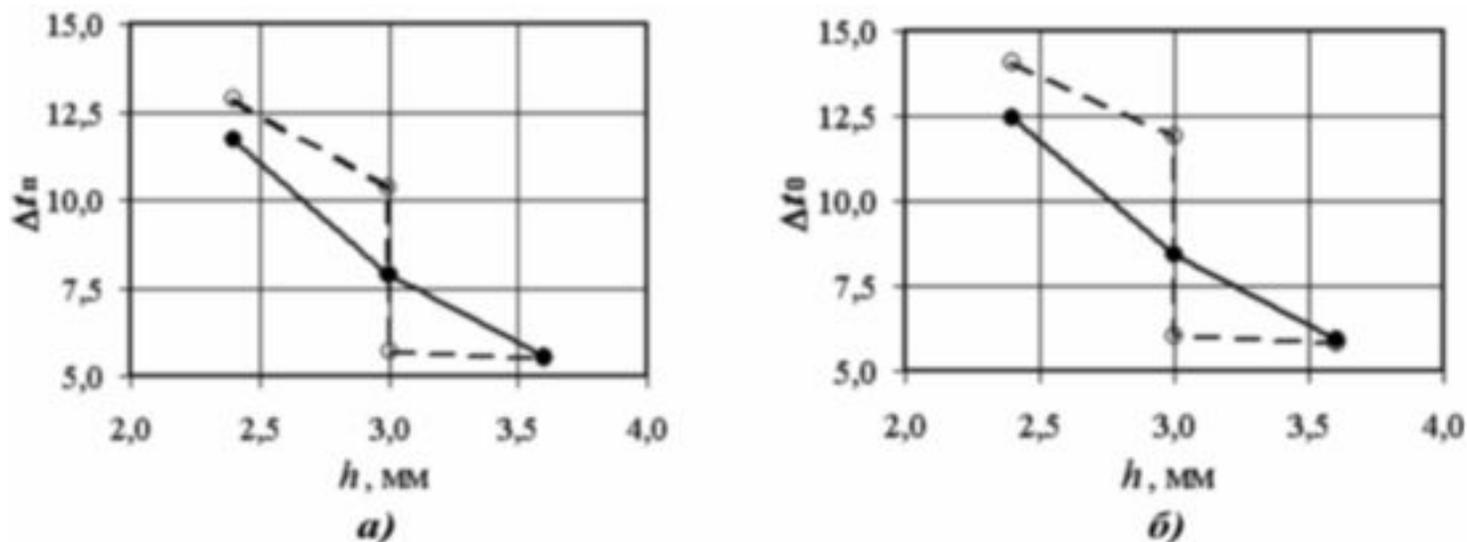
**Рис. 1. Температурное поле в катушках и объёме масла для разных высот горизонтального охлаждающего канала: а – 2,4 мм; б – 3,0 мм; в – 3,6 мм.**



**Рис. 2. Поле скоростей в объёме масла в диапазоне  $0 \dots 0,35 \cdot 10^{-3}$  м/с для разных высот горизонтальных охлаждающих каналов а – 2,4; б – 3,0; в – 3,6 мм.**

Сравнение результатов расчётов перепадов температуры по CFD - модели и по эмпирическому методу «перегревов» приведено в табл. 2 и на рис. 3,4. Поверхностная плотность теплового потока в CFD - модели рассчитывалась на криволинейной поверхности, образованной изолированными обмоточными проводами катушек на границе с трансформаторным маслом. Плотность теплового потока по методу «перегревов» рассчитывалась на поверхно-

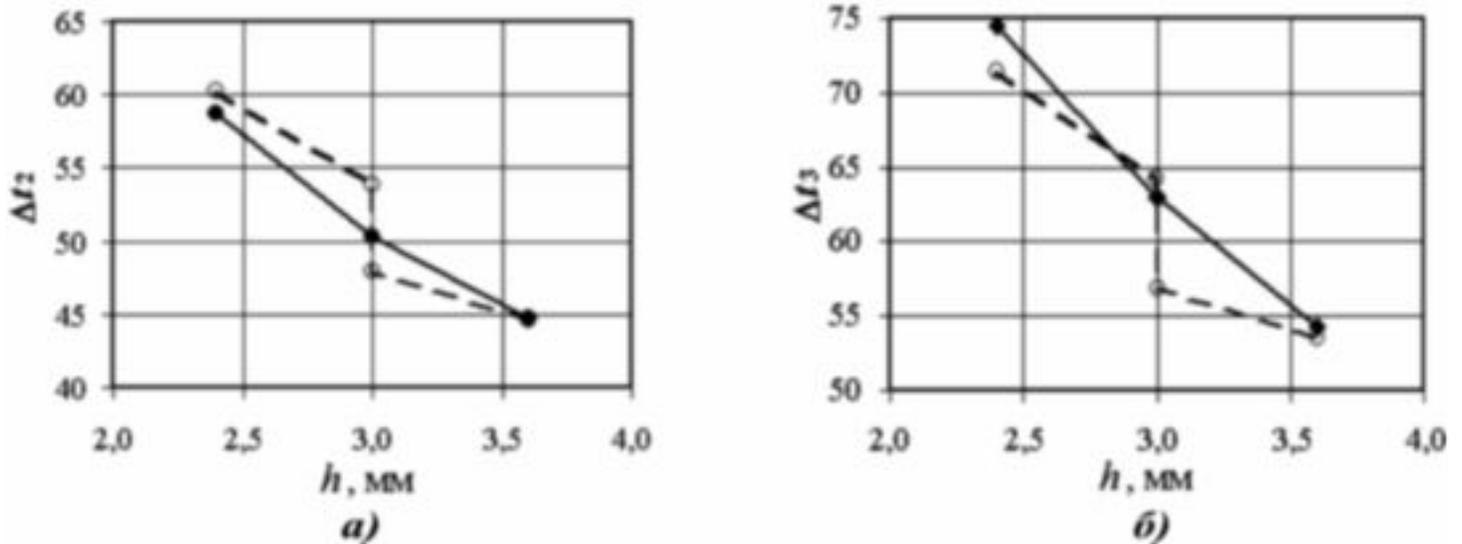
сти цилиндра, образованного поверхностями, касательными к поверхности изолированных проводов. При высоте межкатушечного канала меньше 3 мм в методе «перегревов» вводился эмпирический коэффициент застойной зоны, который учитывал локальное отсутствие (уменьшение) теплопередачи в центральной области горизонтального межкатушечного канала, т.е. существенное ухудшение теплообмена конвекцией в таких каналах.



**Рис. 3. Зависимости превышения средней температуры поверхности обмотки  $\Delta t_n$  (а) и средней температуры объёма обмотки  $\Delta t_0$  (б) над средней температурой масла в баке от высоты горизонтального канала охлаждения  $h$ .  
Сплошные кривые – CFD - модель, пунктирные – методика [13].**

Табл. 2. Сравнение исходных данных и рассчитанных параметров для фрагмента обмотки из 3-х катушек с разными высотами межкатушечного канала, полученных с помощью разработанной методики (CFD – модели) и методики работы [13].

Высота канала, мм	2,40		2,99		3,01		3,60	
Методика расчёта	CFD	[13]	CFD	[13]	CFD	[13]	CFD	[13]
Средняя температура масла в модели CFD, °C	66,25	66,25	61,90	61,90	61,90	61,90	58,81	58,81
Превышение средней температуры поверхности обмотки над средней температурой масла в баке ( $\Delta t_n$ ), °C	11,73	12,89	7,88	10,36	7,88	5,69	5,56	5,52
Превышение средней температуры обмотки над средней температурой масла в баке (СТМБ) всех групп катушек ( $\Delta t_0$ ), °C	12,47	14,06	8,40	11,91	8,40	6,01	5,95	5,84
Превышение средней температуры обмотки над температурой окружающей среды (ТОС) ( $\Delta t_2$ ), °C	58,72	60,31	50,30	53,81	50,30	47,91	44,76	44,65
Превышение температуры наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки над температурой окружающей среды (ТОС) ( $\Delta t_3$ ), °C	74,45	71,43	62,95	64,17	62,95	56,89	54,35	53,51



**Рис. 4. Зависимость превышения средней температуры обмотки  $\Delta t_2$  (а) и температуры наиболее нагретой точки обмотки  $\Delta t_3$  (б) над температурой охлаждающей среды от высоты горизонтального канала охлаждения  $h$ . Сплошные кривые – CFD- модель, пунктирные – методика [13].**

Результаты сравнения показывают следующее:

1. Средняя температура масла в расчётной модели падает при увеличении высоты межкатушечного канала, что определяется увеличением объёма масла в канале и фрагменте обмотки.

2. Превышение средних температур поверхности обмотки, средних температур объёма обмотки и температуры наиболее нагретой точки над средней температурой масла в баке и температурой охлаждающей среды уменьшаются с ростом высоты межкатушечного канала, что объясняется улучшением условий конвекции (циркуляции масла в горизонтальных каналах охлаждения) с ростом высоты межкатушечного канала.

3. При расчёте на основе инженерной методики работы [13] наблюдается скачок (разрыв функциональной зависимости) при стремлении высоты межкатушечного канала к величине  $(3 \pm 0)$  мм, который объясняется особенностями этой методики, использующей коэффициент ухудшения конвекции только в узких каналах меньше 3 мм.

При расчёте по двум методикам (CFD и эмпирической инженерной методике) величин, фигурирующих в методе «перегревов», получились следующие отклонения между результатами:

для превышения средней температуры поверхности обмотки над средней температурой масла в баке отклонения не превысили  $\pm 2,5$  °С;

для превышения средней температуры объёма обмотки над средней температурой масла в баке группы катушек отклонения не превысили  $\pm 3,5$  °С;

превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой охлаждающей среды составили отклонения порядка  $\pm 5$  °С;

### Выводы

Разработанная авторами ранее CFD – методика численного моделирования нагрева катушечных обмоток масляных трансформаторов при свободной конвекции масла в каналах позволяет выявить качественные особенности и получить количественные распределения полей скоростей, температур и давлений в вертикальных и горизонтальных каналах обмоток силовых масляных трансформаторов, а также определять средние температуры в произвольном сечении каждого из каналов, средние температуры масла в произвольном канале, а также расходы в отдельных каналах обмотки.

С помощью разработанной методики получены уточнённые количественные данные для превыше-

ния средней температуры поверхности обмотки и самой обмотки 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.). Эти зависимости имеют непрерывный характер (снижение абсолютного значения величин с ростом высоты канала), что естественно для протекающих в каналах теплогидравлических процессов. В то же время зависимости, полученные с помощью эмпирической методики, имеют разрыв для высоты канала 3,0 мм, что обусловлено наличием в методике так называемого коэффициента застойной зоны для высот канала менее 3,0 мм. Таким образом, результаты, полученные с помощью CFD – модели для высоты канала в областях, близких к 3,0 мм являются более точными по сравнению с изложенными в эмпирической методике.

На примере проведённых расчётов теплового состояния группы катушек трансформатора показана возможность применения разработанных моделей и методики численного моделирования нагрева катушечных обмоток масляных трансформаторов для уточнения (дальнейшего совершенствования) методики «перегревов» в диапазонах её применимости.

Для совершенствования эмпирической методики «перегревов» возможна разработка и исследование трёхмерных параметрических компьютерных микромоделей для групп катушек обмотки трансформатора, учитывающих наличие дистанцирующих прокладок и реек, что в свою очередь даст, в частности, возможность уточнения зависимости коэффициента застойной зоны от высоты канала для каналов в диапазоне около 3,0 мм и менее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2008, № 1. – С. 45–69.
2. Силовые трансформаторы. Справочная книга /Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат. – 2005. – 614 с.
3. Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah and Rajendra Ahuja Transformer design principles: with application to coreform transformers // Gordon and Breach Science Publishers. – 2001. – 599 p.
4. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России. Часть 1 // Электричество. – 2000. – № 8. – С. 2–10; Часть 2 // Электричество. – 2000. – № 9. – С. 4–12.
5. Готтнер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин: Пер. с нем. Под ред. В.В. Мальцева – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
6. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 36).
7. Горовых В. Г., Конторович Л. Н. Методика расчёта локальных коэффициентов теплоотдачи в каналах катушечных обмоток трансформаторов // Промышленная теплотехника 1989. – № 3. – С.33–36.
8. Дулькин И.Н., Люблин И.Ш. Метод теплового расчета обмоток силовых масляных трансформаторов // Электротехника. – 1997. – № 2. – С. 16–22.
9. Одаренко Ю.М. Розвиток методів подібності при теплообміні в охолоджуючих каналах обмоток трансформаторів для удосконалення їх теплового захисту. Автореферат дис. канд. техн. Наук: 05.14.06 / Дніпродзержинський держ. техн. ун-т. Дніпродзержинськ: 2006. – 19 с.
10. Одаренко Ю.Н., Яковлева И.Г. Анализ критерияльных уравнений теплоотдачи обмоток трансформаторов // Электрический журнал. – 2006. – № 1. – С. 11–15.
11. Козлов В.В. Підвищення ефективності примусового охолодження високовольтичних масляних трансформаторів: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". – Х.: 2004. – 19 с
12. Рассальский О.М. Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустаткування. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 144 с.
13. Mikhailovsky Y.A., Shvidler A.B., Tarle G.E., Tchornogotsky 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. A12-16.
14. Стандарт МЭК «Силовые трансформаторы. Ч.7

– Руководство по нагрузке маслонеполненных трансформаторов». Первая редакция. СЕИ/ЕС 60076-7:2005.

15. *Tanguy A., Patelli J.P., Devaux F., Taishe J.P., Ngnegueu T.* Thermal performance of power transformers: thermal calculation tools focused on new operating requirements. Presented at CIGRE Session, CIGRE, Paris, France, Session 2004, Report Nr. A2–105.

16. *Mufuta J.-M., Eric van den Bulck.* Modeling of the mixed convection in the winding of a disc- type power transformer // *Applied Thermal Engineering* 20 (2000). – P. 417–437. <http://www.elsevier.com>.

17. *Круковский П.Г., Яцевский В.А., Конторович Л.Н., Иванков В.Ф., Юрченко Д.Д.* Методические подходы к CFD – моделированию тепловых режимов силовых масляных трансформаторов // *Промышленная теплотехника*. – 2008. – Т.30, № 6. – С. 57–66.

18. *Круковский П.Г., Яцевский В.А., Конторович Л.Н., Иванков В.Ф., Юрченко Д.Д.* CFD – моделирование теплообмена в катушечных обмотках трансформаторов при естественной конвекции охлаждающего масла // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – №4. – С. 17–26.

19. *Oliver A. J.* Estimation of transformer winding temperatures and coolant flows using a general network method // *IEE Proc.*, Vol. 127, Pt. C.– № 6, November 1980. – P. 395–405.

20. *Seitlinger Walter* Thermo-Hydraulic transformer model //VA TECH Elin Transformatoren GmbH.2000. <http://www.vatechtd.com>.

Получено 11.06.2009 г.