

532.542:536.252/255:621.314.212

Яцевский В.А., Круковский П.Г.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ МАСЛА ВО ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ КАНАЛАХ КАТУШЕЧНЫХ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проведено комп'ютерне моделювання температурних і гідродинамічних полів у силовому маслonaповненому трансформаторі за допомогою програми ANSYS-FLUENT. Аналіз картини течії в системі взаємопов'язаних каналів дозволив виявити мимовільну зигзагоподібну течію масла по групам горизонтальних каналів.

Проведено компьютерное моделирование температурных и гидродинамических полей в силовом маслonaполненном трансформаторе с помощью программы ANSYS-FLUENT. Анализ картины течения в системе взаимосвязанных каналов позволил выявить самопроизвольное зигзагообразное течение масла по группам горизонтальных каналов.

A computer simulation of temperature and hydrodynamic fields in the power oil filled transformers using ANSYS-FLUENT. Analysis of flow patterns in a system of interconnected channels revealed spontaneous zigzag for oil in groups of horizontal channels.

c_p – теплоёмкость;
 g – ускорение свободного падения;
 H – высота обмотки;
 h – высота горизонтального межкатушечного канала;
 P – полное давление;
 ΔP – перепад давления;
 Pr – число Прандтля;
 q – плотность теплового потока;
 Ra – число Релея;
 T – температура;
 α – коэффициент теплоотдачи;

β – коэффициент термического расширения масла;
 Δv_{c-m} – превышение температуры поверхности катушки над температурой масла в горизонтальном канале;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ν – кинематический коэффициент вязкости;
 ρ – плотность;
 CFD – Computational Fluid Dynamic.

Индексы нижние:

m – масло;
 c – стенка.

Введение

Силовые высоковольтные трансформаторы повсеместно используются в современных электрических сетях в процессе многократной передачи электрической энергии от генерирующего оборудования до конечных потребителей. Основными источниками теплоты в силовых трансформаторах и электрических реакторах являются элементы активной части - обмотки и магнитная система. Активная часть силовых трансформаторов, как правило, помещается в бак, заполненный трансформаторным маслом или другой диэлектрической жидкостью. Поэтому достоверная детальная информация о тепломассообменных процессах между твёр-

дотельными деталями трансформаторного оборудования и маслом позволяет конструировать и эксплуатировать это оборудование с высокой степенью надёжности, а также оптимизировать срок его эксплуатации.

Современные мощные высоковольтные маслonaполненные силовые трансформаторы представляют собой значительные по габаритным размерам и весу (достигают нескольких сотен тонн) сооружения, со сложноорганизованной геометрической структурой внутри бака. Количество отдельных узлов и конструктивных элементов в них достигает ста, при этом многие конструктивные элементы имеют сложную геометрическую конфигурацию, а их ко-

эффективности теплопроводности отличаются на несколько порядков. При численном моделировании тепломассообменных процессов в трансформаторном оборудовании эти обстоятельства приводят к принципиальным трудностям построения оптимальной разностной сетки, так как высота обмоток и магнитной системы исчисляется метрами, высота вертикальных и горизонтальных каналов – миллиметрами, а толщина изоляции обмоточных проводов – десятыми долями миллиметра [1-5]. Тепловыделения в основных деталях активной части (рис. 1) (обмотках низшего и высшего напряжения и магнитной системе) сильно неоднородно по пространственным координатам вследствие зависимости омических потерь от локальной температуры, а также дополнительного вклада в основные потери за счёт вихревых токов и гистерезисных потерь. Процессы теплопередачи в силовых маслонаполненных трансформаторах неразрывно связаны с условиями и характером движения масла в системе, особенно в вертикальных и горизонтальных каналах катушек. Иными словами, поле температур и поле гидродинамических переменных (компонентов скорости и давления) сильно взаимосвязаны [1].

В силовых трансформаторах довольно часто применяются системы охлаждения М и Д, при использовании которых в маслонаполненном баке силовых трансформаторов теплоотвод от тепловыделяющих элементов конструкции осуществляется за счёт естественной тепловой гравитационной конвекции, и система охлаждения ДЦ (принудительное охлаждение) – с теплоотводом внутри бака за счёт смешанной (естественной и вынужденной) конвекции. При этом в силовых трансформаторах действие естественной и вынужденной конвекции имеет одинаковое направление – снизу-вверх. Скорость движения масла в вертикальных каналах (ширина канала по обыкновению составляет 7...14 мм) даже при использовании системы охлаждения ДЦ не превышает 0,8 м/с. В горизонтальных межкатушечных каналах обмоток (как правило, высота горизонтальных кана-

лов 3...12 мм) скорость движения масла, даже при направленной циркуляции, не превышает 0,1 м/с, а в большинстве случаев при естественной конвекции $\sim 10^{-3}$ м/с.

Экспериментальное определение теплового состояния элементов активной части силовых трансформаторов (в первую очередь обмоток) может производиться на дорогих экспериментальных физических моделях и, в большинстве случаев вследствие специфики исследуемых объектов, находящихся при напряжениях в несколько сотен тысяч вольт, не отличается высокой точностью. Всё же производители силовых трансформаторов и электрических реакторов на этапе расчётного проектирования в значительной мере используют результаты экспериментальных исследований физических моделей и натурных испытаний трансформаторов. Однако область применения таких инженерных методик существенно ограничивается только диапазонами ранее изученных геометрических и режимных параметров, что определяет непрерывную потребность в совершенствовании инженерных методик расчётов и, для универсализации, максимальном исключении из них эмпирических данных. Поэтому в последнее время исследователи и разработчики всё чаще пользуются инструментарием так называемого CFD-моделирования, основанного на численном решении полной системы уравнений Навье-Стокса, уравнений сохранения массы и энергии, позволяющем в максимальной мере учитывать реальную геометрию отдельных конструктивных деталей трансформатора и в минимальной мере использовать эмпирические данные о теплообмене и гидродинамике в системе каналов охлаждения исследуемого трансформатора [1,3-5]. Детальный анализ применяемых в настоящее время подходов, методов и моделей для расчёта теплового состояния силового трансформаторного оборудования, их преимуществ и недостатков приведён в работе [3].

Для детальной проработки инновационных конструкторских решений и технических предложений, оценки от внедрения тех или иных

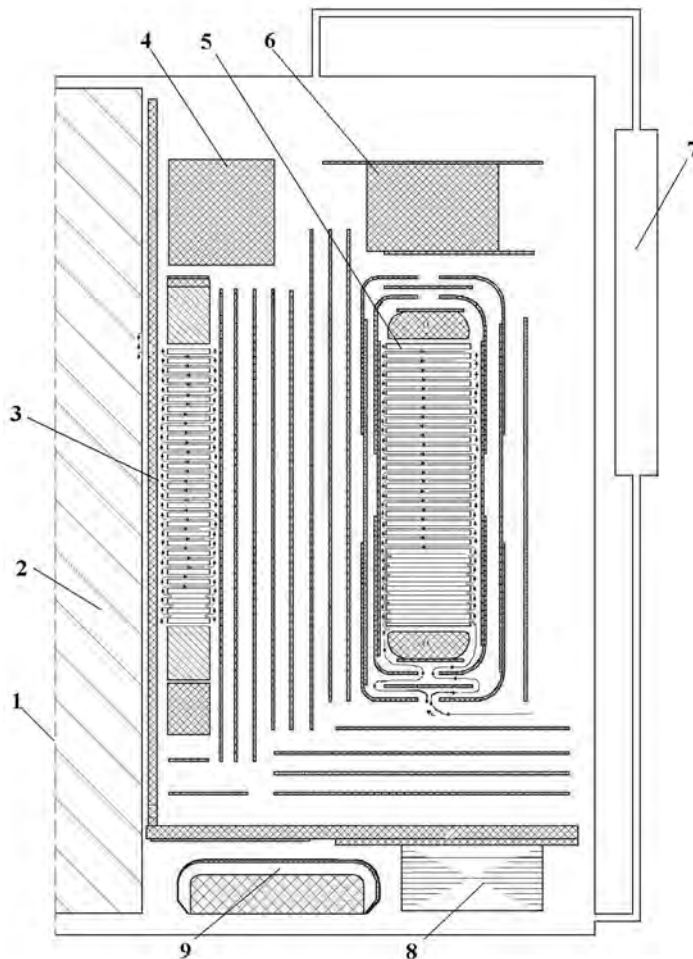


Рис. 1. Схема силового трансформатора, включающая активные части и систему внешнего охлаждения:

1 – ось симметрии; 2 – стержень магнитной системы; 3 – обмотка низшего напряжения (НН); 4 – прессующее кольцо над обмоткой НН; 5 – обмотка высшего напряжения (ВН); 6 – прессующее кольцо над обмоткой ВН; 7 – радиатор системы внешнего охлаждения; 8 – шунт под обмоткой ВН; 9 – шунт под обмоткой НН.

инноваций по интенсификации процессов теплообмена в трансформаторном оборудовании большое значение имеет достоверная информация по локальным характеристикам течения и теплопереноса, которые довольно сложно получить классическими упрощёнными интегральными методами расчёта или экспериментальными методами [1, 3-5].

При таком проектировании особый интерес представляет анализ особенностей течения масла в горизонтальных межкатушечных каналах обмоток трансформатора и связанных с ними особенностей теплообмена катушек с маслом. Детальное CFD-моделирование позволяет проводить такой анализ, в частности выявление возможных гидродинамических конвективных структур и связанных с ними распределений температурного поля. Это определяется локально-неоднородным движением высоковязкой жидкости ($Pr = 50...500$) вследствие тепловой гравитационной конвекции, сопровождающейся рециркуляцией и вихревыми течениями, в результате которых в объёме бака трансформатора, а также в горизонтальных и вертикальных каналах обмоток образуются устойчивые структуры в виде зигзагообразного и/или петлеобразного движения масла по группам горизонтальных каналов. Большой интерес представляет анализ причин образования и развития таких структур.

Целью настоящей работы и является проведение такого исследования и анализ особенностей течения трансформаторного масла и его влияния на теплообмен в межкатушечных каналах силовых трансформаторов с помощью двухмерных детальных численных моделей, разработанных в среде программы ANSYS-FLUENT.

Для достижения этой цели были выполнены следующие работы, традиционные для численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена:

- создана детальная двухмерная компьютерная CFD-модель выбранного трансформатора (рис. 1) мощностью порядка 140 МВ·А для анализа теплообменных процессов, происходящих в нём;
- получено численное решение модели относительно полей температур, скоростей и давлений;
- с помощью постпроцессорной обработки визуализирован и описан характер циркуляции масла, а также найдены численные значения тепловых характеристик (температур, теплопереноса).

вых потоков и коэффициентов теплоотдачи) на поверхностях катушек и скоростей и давлений в межкатушечных каналах.

Естественная тепловая гравитационная конвекция в объёме бака и присоединённой к нему системе внешнего охлаждения (как правило, совокупности пластинчатых радиаторов) осуществляется под действием массовых сил, обусловленных температурным расширением жидкости (трансформаторного масла), т.е. вследствие температурных неоднородностей. Температурная неоднородность, в свою очередь, приводит к неоднородности плотности масла и давления и приводит к образованию градиента плотности, направленного противоположно массовой силе (силе тяжести) [6-7]. В результате в системе инициируются архимедовы силы, возникают восходящие и нисходящие потоки жидкости, но при этом возникают и противодействующие архимедовым внутренние силы трения, направленные против движения. После установления динамического равновесия (баланса) этих сил, – в рассматриваемом объекте возникает циркуляция жидкости, – иными словами сложное поведение жидкости в системе, с помощью которого физическая система приспособляется к внешним воздействиям (подводу тепловой энергии внутри неё и теплообросу тепловой энергии на внешних границах системы). По-другому, это можно определить как возникновение упорядочённости и согласованности системы, т.е. возникновение в ней самоорганизации [6, 10-11]. Сложность геометрии совокупности реальных вертикальных и горизонтальных каналов, по которым движется охлаждающая жидкость, приводит в итоге к сложным картинам конвективных течений, затрудняющим их анализ и систематизацию по причине разномасштабности определяющих критериев в разных частях системы. К тому же, как свидетельствуют достоверные экспериментальные данные и многочисленные результаты теоретических исследований, в ряде случаев при естественной тепловой гравитационной конвекции возможны (и реально наблюдаются) ситуации, в которых существует возможность

реализации нескольких режимов течения при одном и том же наборе режимных и геометрических параметров [6].

Основные особенности конвекции в силовых трансформаторах обусловлены наличием двух обстоятельств, определяющих конкретную реализацию эффектов плавучести в рассматриваемой системе (рис. 1):

1. Сильно неоднородное объёмное тепловыделение по высоте и радиусу;
2. Наличие в системе качественно различных по геометрии и масштабам взаимосвязанных подобластей, которые можно объединить в пять подобластей (классов, кластеров):
 - 2.1 Подобласть межкатушечных горизонтальных каналов, которых в сумме для нескольких обмоток (концентроров) силового трансформатора или электрического реактора может быть несколько сотен;
 - 2.2 Подобласть вертикальных каналов, образованных деталями изоляционной системы;
 - 2.3 Подобласть между активной частью (обмотками, вертикальными ярмами магнитной системы) и боковой стенкой бака;
 - 2.4 Подобласть от верхнего горизонтального ярма до крышки бака;
 - 2.5 Подобласть от нижнего горизонтального ярма до дна бака.

Конкретная картина течения масла возле охлаждаемых элементов внутри бака зависит от конструкторского варианта решения внутреннего пространства бака (соотношения размеров охлаждающих вертикальных и горизонтальных межкатушечных каналов), величины и пространственного распределения тепловыделений в объёме и рассматриваемой стадии динамического процесса. В связи с достаточно большими линейными размерами реальных силовых трансформаторов (высота бака может находиться в интервале 4...5 м) критерии Релея (или Грасгофа) могут достигать достаточно больших величин ($\sim 10^{12} \dots 10^{13}$) при выборе в качестве характерного размера внутренней высоты бака и реального перепада температур (10...30 °С) между верхним и нижним частями масла. Это говорит о возможности существен-

ной локальной интенсификация конвективного теплообмена. Течение в вертикальных каналах имеет характер обычного течения в кольцевых каналах с формированием пограничных слоёв вдоль ограничивающих твёрдых поверхностей. В относительно больших подобластях возле горизонтальных и вертикальных стенок бака формируются вторичные вихревые структуры, взаимодействующие с пограничными слоями, образовавшимися на стенках бака.

При рассмотрении конвекции и теплообмена в горизонтальных межкатушечных каналах могут формироваться условия преимущественного направления потока теплоты от нижней поверхности канала к верхней, при которых в протяжённых горизонтальных каналах возникают конвективные ячейки Релея – Бенара (рис. 2).

В случае если нижняя поверхность горизонтального канала и нижние слои масла нагреты

сильнее, чем верхние, то возникает дестабилизирующий гидродинамический эффект, который пытается переместить масло так, чтобы наверху образовались более лёгкие, нагретые слои жидкости. Именно этот эффект вызывает появление вихрей Релея-Бенара, обусловленных естественной конвекцией [6, 7].

В качестве математической модели для численного исследования ламинарного течения и температурного состояния вязкой несжимаемой жидкости (трансформаторного масла) использовались полные уравнения Навье-Стокса [8, 9]. Предполагается, что имеет место осевая симметрия течения, а угловая (азимутальная) компонента вектора скорости жидкости относительно оси симметрии равна нулю. Все теплофизические характеристики жидкости (вязкость, теплопроводность, плотность и теплоёмкость) являются функциями локальной температуры. На внешних границах бака

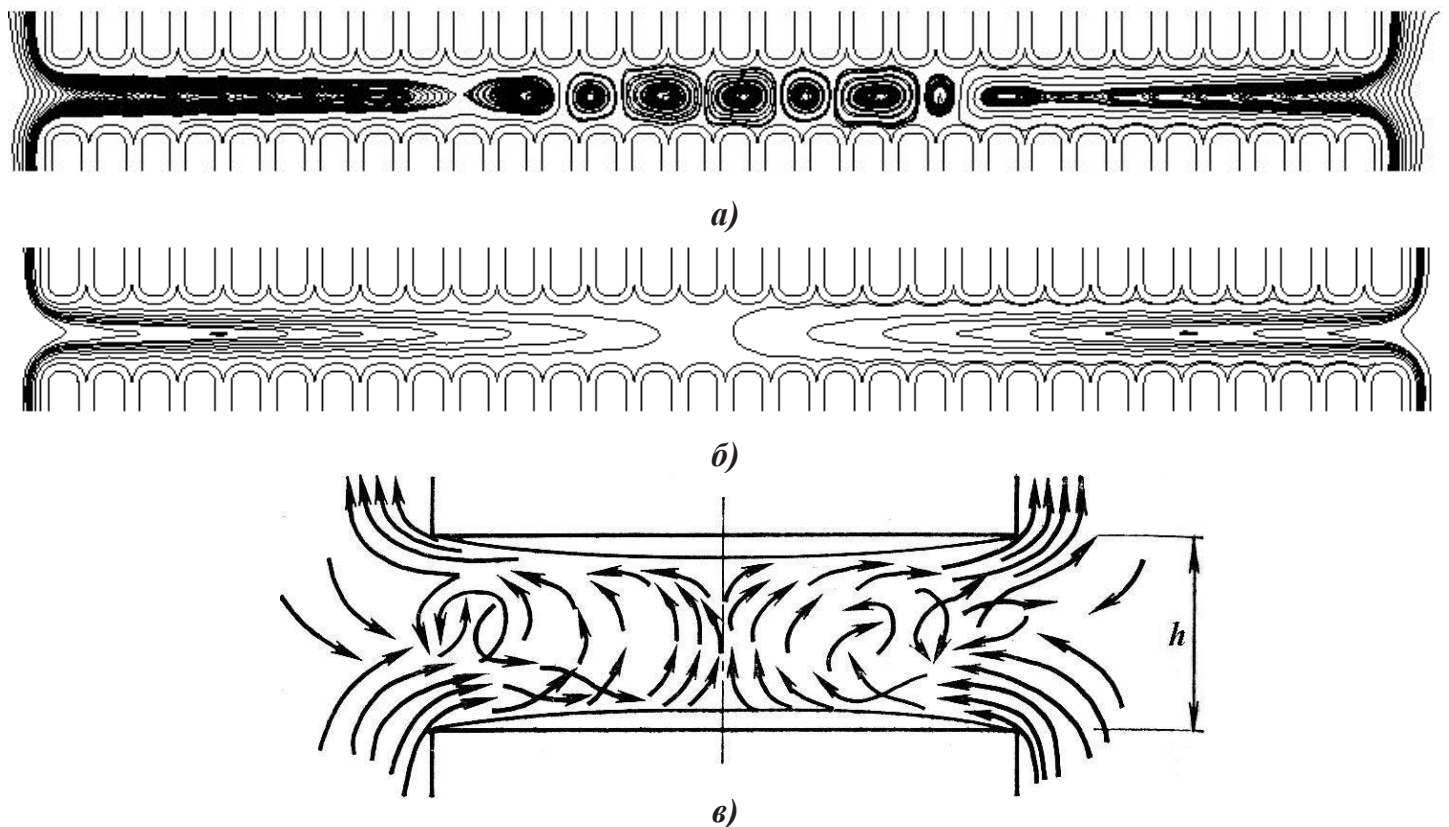


Рис. 2. Линии тока: в межкатушечном горизонтальном канале: а – с образованием в центре канала ячеек Релея-Бенара; б – с петлеобразным характером течения; в – картина течения, приведенная в работе [2].

и системы внешнего охлаждения (радиаторов) задавались нелинейные граничные условия третьего рода, полученные из обобщённых экспериментальных данных (эмпирических соотношений), учитывающих конвективный и лучистый теплообмен.

Для детального расчёта процессов тепло-массопереноса и течения в баке силового трансформатора требуется построение подробных адаптивных сеток с максимальным количеством узлов вблизи многочисленных твёрдых поверхностей, на которых в процессе термической конвекции происходит образование и разрушение гидродинамических и тепловых пограничных слоёв [8, 9]. Поэтому при построении расчётной сетки производилось необходимое сгущение сетки вблизи твёрдых теплообменных поверхностей катушек и других тепловыделяющих частей трансформатора. Общее количество расчётных ячеек сеточной модели, описывающей тепловое и гидродинамическое состояние трансформатора (рис. 1) составляло около 300 тыс., при этом минимальная площадь ячейки составляла $1,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а максимальная – $3,55 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, что характеризует степень неравномерности сетки.

Известно, что при конвективном теплообмене как интегральные, так и локальные характеристики теплообмена определяющим образом зависят от характера и структуры течения. Картина температурных и гидродинамических полей меняется в зависимости от режима охлаждения трансформаторного оборудования и в течение нестационарного процесса, при этом на разных этапах нестационарного процесса имеются как количественные, так и качественные отличия. Направление циркуляции в отдельных каналах на протяжении нестационарного процесса может неоднократно изменяться на противоположное. Наибольший интерес результаты численного моделирования представляют на квазистационарной стадии динамического процесса, как наиболее часто встречающиеся в реальной практике эксплуатации силовых трансформаторов. Эти результаты приведены в последующем тексте.

Численное решение даёт весьма сложную структуру течения [3-5]. Основной особенностью конвективных течений при термической гравитационной конвекции в распределённой взаимосвязанной системе каналов является одновременное присутствие зон с различной картиной течения. Детальный характер и картина течения, его интенсивность определяются совокупностью конструктивных и режимных параметров, иными словами картина течения определяется процессом нелинейного взаимодействия скалярных полей температур, давлений и векторного поля скоростей. Дополнительным осложняющим фактором является наличие сложной геометрии области, в которой происходит циркуляция жидкости.

На рис. 3 приведено распределение радиальной компоненты вектора скорости посередине обмотки высшего напряжения (ВН) в зависимости от высоты. Как видно из результатов расчёта, по высоте обмотки образовалось 11 групп каналов (приблизительно по 14...15 каналов в группе), в которых характер течения масла имеет преимущественно одинаковое направление – от оси симметрии на периферию обмотки в сторону боковой стенки бака или в противоположном направлении. Между отдельными группами каналов имеются каналы, в которых радиальная компонента вектора скорости существенно меньше, чем в центральных каналах группы (застойные зоны). Учитывая значительную высоту обмотки ~3 м, на рис. 4 представлен отдельный фрагмент этого распределения радиальных компонент векторов скоростей в выбранном диапазоне по высоте (четвёртая группа каналов при отсчёте снизу обмотки).

Качественно образование зигзагообразного движения охлаждающей жидкости в горизонтальных каналах можно объяснить взаимодействием полей скорости и возникающего при движении поля давления, которые в результате нагрева масла и влияния архимедовой силы сначала инициируют движение в одном направлении горизонтальных каналов, а после достижения определённого уровня градиента

давления в результате действия закона сохранения массы возникает торможение движения и инверсия его направления.

На рис. 3 и 4 отчетливо видны группы горизонтальных каналов, в которых движение происходит в направлении от оси симметрии в сторону боковой стенки бака и в которых жидкость движется в противоположном направлении. Таким образом, можно прийти к выводу, что в совокупности каналов формируется макроструктура течения в последовательных группах однотипных каналов (от 3 до 15 каналов в зависимости от режима охлаждения, мощности и распределения объемных тепловыделений,

а также этапа динамического процесса). Направление течения в соседних группах каналов должно быть противоположным, что детерминируется законом сохранения массы (уравнением неразрывности).

При этом, как видно из рис. 4, максимальное значение радиальной компоненты вектора скорости в этой группе каналов $\sim 2,2 \cdot 10^{-3}$ м/с имеет место приблизительно в среднем канале группы. В остальных каналах группы максимальное значение скорости уменьшается приблизительно по параболическому закону. В крайних каналах группы величина радиальной компоненты вектора скорости на порядок меньше

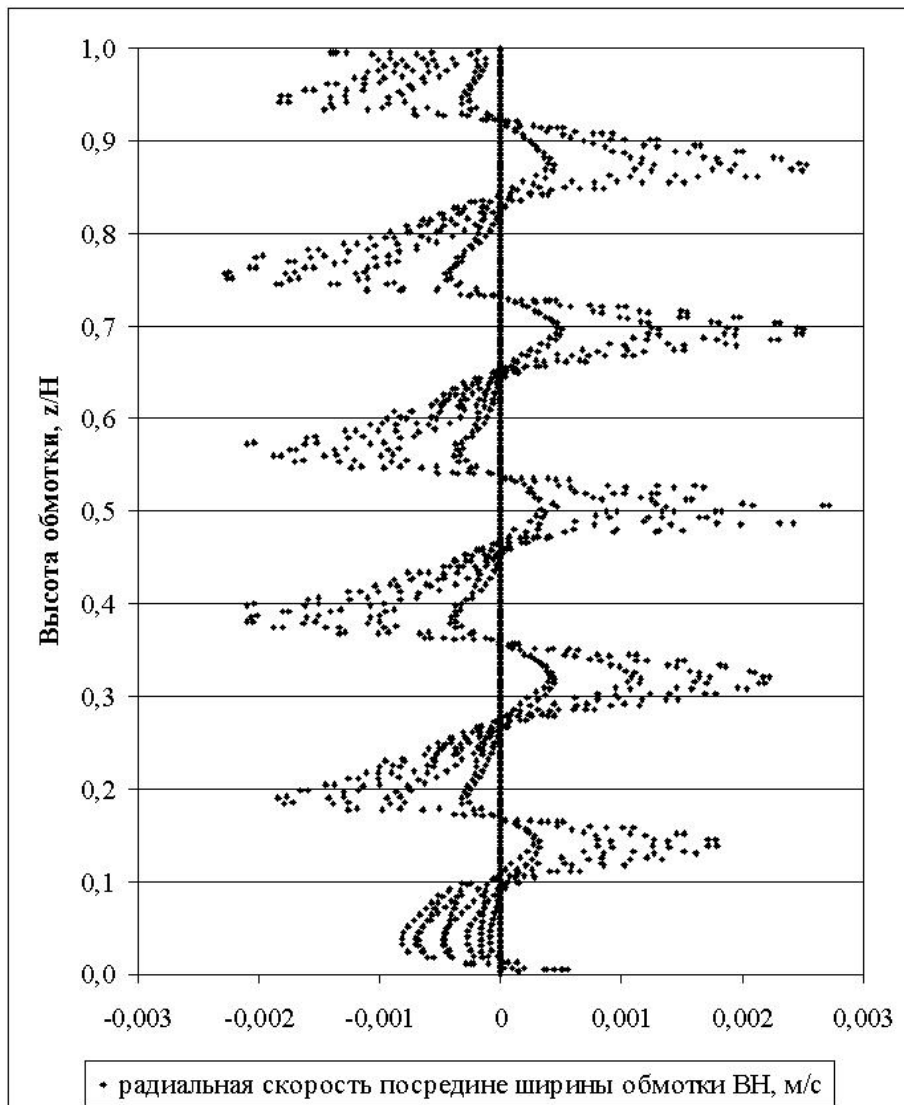


Рис. 3. Распределение радиальной компоненты вектора скорости по относительной высоте обмотки ВН с 1-й (внизу) по 156-ю катушку (вверху).

($1,4 \cdot 10^{-4} \dots 2,1 \cdot 10^{-4}$ м/с) и процесс теплопереноса в них происходит, по видимому, преимущественно за счёт механизма теплопроводности. Качественно аналогичный характер течения наблюдается и в остальных группах каналов с одинаковым направлением радиальной компоненты вектора скорости.

На рис. 5 представлено изменение перепада полного давления по высоте обмотки на касательных к внутренней и наружной поверхностям. Как видно из рис. 3 и 5 качественный характер изменения по высоте радиальной компоненты вектора скорости и перепадов давления близки между собой.

Поле температур в катушках обмоток также теряет осевую симметрию, что связано со сквозным течением охлаждающего масла в выделенном направлении по радиусу катушек как это представлено на рис. 3 и 4. Локальные максимумы температур в катушках сдвигаются в сторону направления градиента скорости. Распределение по высоте обмотки наиболее нагретых точек каждой из катушек имеет немонотонный характер. Совокупность локальных максимумов температуры каждой из катушек обмотки располагается на кривой, качественно напоминающей синусоиду, т.е. имеющей S-образный вид в зависимости от аксиальной

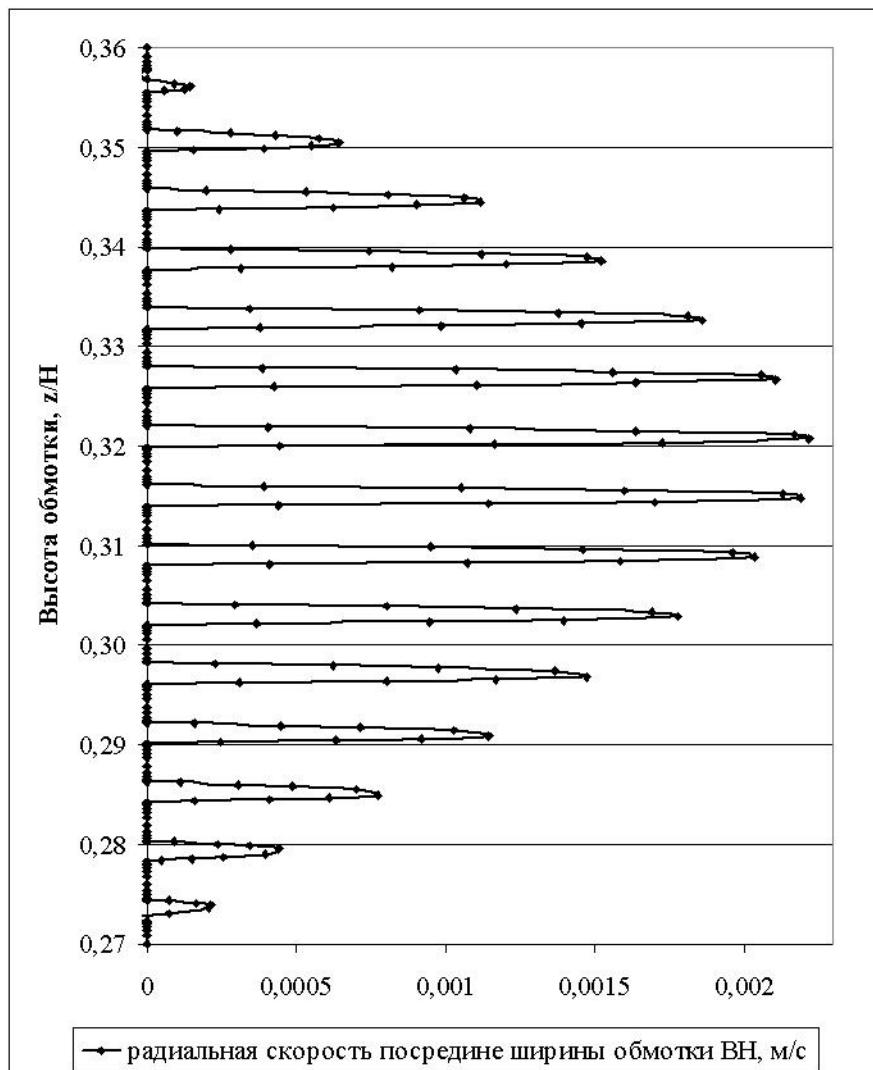


Рис. 4. Распределение радиальной компоненты вектора скорости по высоте обмотки ВН с 42-й (внизу) по 57-ю катушку (вверху).

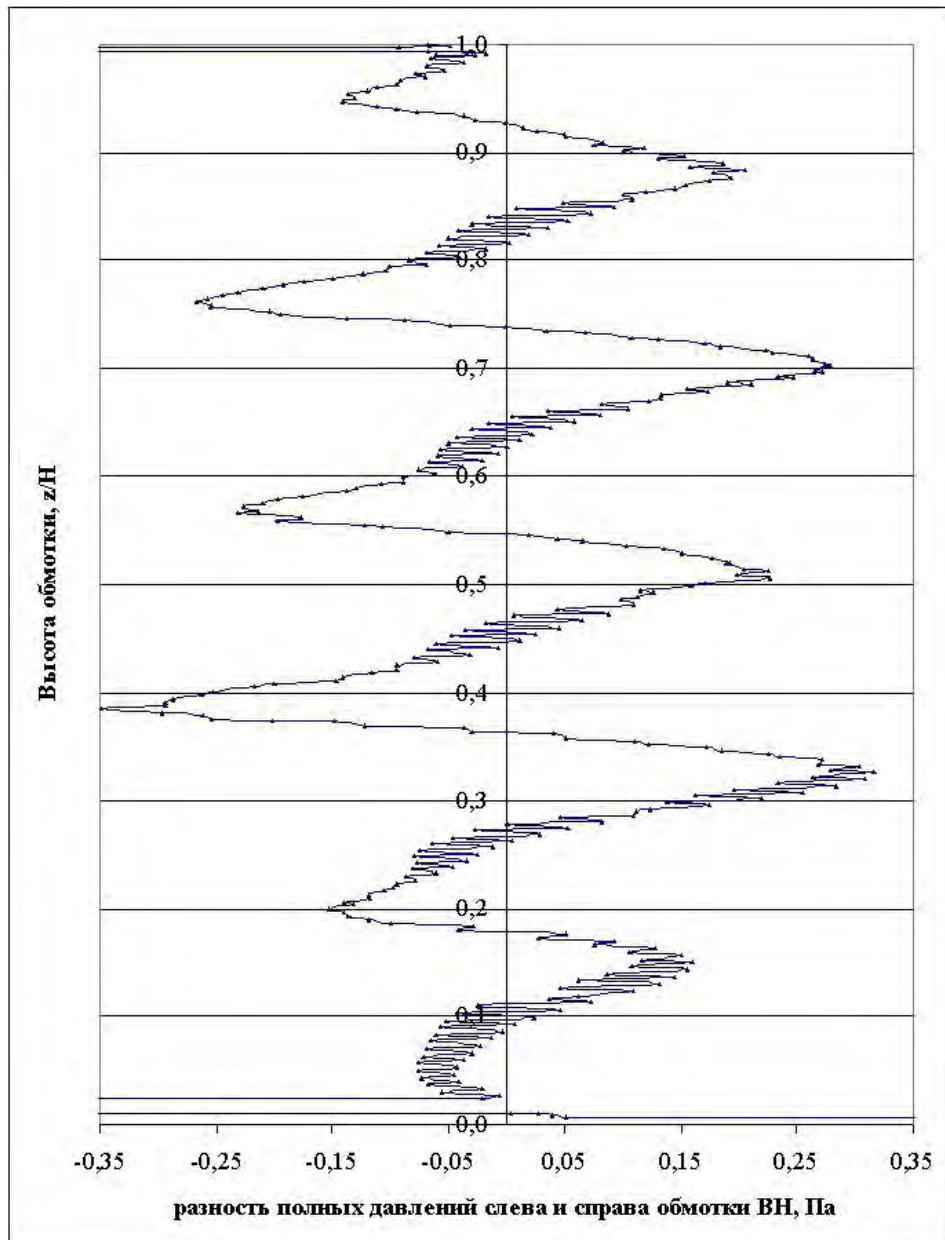


Рис. 5. Распределение перепада полного давления по высоте обмотки ВН.

координаты (высоты обмотки).

На рис. 6 приведено распределение коэффициентов теплоотдачи на верхней и нижней поверхности 50-й снизу катушки обмотки ВН (состоящей из 156 катушек), т.е. катушки в которой радиальная компонента вектора скорости имеет максимальное значение. При этом радиальная компонента вектора скорости в нижнем (нижепримыкающем к катушке) канале несколько больше, нежели в верхнем горизонтальном канале. В подавляющей по

площади средней части горизонтальных поверхностей значения коэффициентов теплоотдачи $\sim 100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. В областях, примыкающих к внутреннему и наружному вертикальному охлаждающему каналу, в результате разрушения (образования) пограничных слоёв на боковых вертикальных поверхностях катушек локальная разность температур между поверхностью катушки и маслом минимизируется, а коэффициент теплоотдачи испытывает флуктуации.

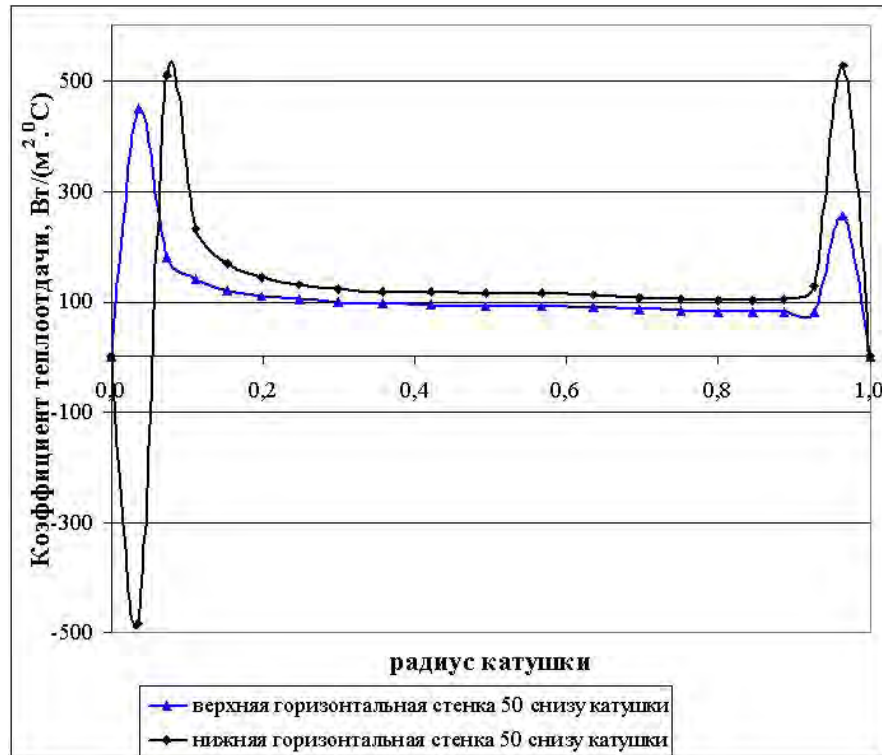


Рис. 6. Распределение коэффициентов теплоотдачи по радиусу верхней и нижней поверхности 50-й снизу катушки обмотки высшего напряжения.

Для сравнения с эмпирическими данными использовалась корреляция, представленная в работе Hong S. W., Morcos S.M., Bergles A.E. [12], на которую, в качестве применимой для анализа теплового состояния катушечных обмоток силовых трансформаторов, ссылается автор работы [13]. В работе [12] получена эмпирическая корреляция данных для полностью развитой естественной конвекции произвольной жидкости в горизонтальной трубе, которая записывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{\lambda_m}{h} \cdot 0,817 \cdot Ra^{0,215} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_m} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-0,382},$$

где число Релея $Ra = \frac{g\beta h^3 \Delta\vartheta_{c-m} c_p \rho}{\nu \lambda}$.

Для горизонтальных каналов коэффициент теплоотдачи и число Нуссельта при естественной конвекции в работе [12] находились следующим образом: в качестве определяющего раз-

мера для горизонтального канала используется его высота, а качестве определяющей температуры жидкости — средняя температура масла в сечении канала, в котором определяется локальная теплоотдача. При проведении расчётов по вышеприведённой эмпирической формуле (число Релея для верхней поверхности катушки равнялось $5,9 \cdot 10^3$, а для нижней поверхности катушки $3,5 \cdot 10^3$) коэффициент теплоотдачи для верхней поверхности катушки составил $118 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, а для нижней поверхности катушки — 105 . При усреднении данных численных расчетов, представленных на рис. 5, коэффициент теплоотдачи для верхней поверхности катушки составил $128 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, а для нижней поверхности катушки — $113 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Выводы

1. С помощью CFD-моделирования проведен анализ особенностей течения масла в горизонтальных межкатушечных каналах обмоток трансформатора и связанных с ними особенностей теплообмена катушек с маслом.

2. Выявлены гидродинамические конвективные структуры и связанные с ними распределения температурного поля, которые определяются локально-неоднородным движением высоковязкой жидкости ($Pr = 50...500$) вследствие тепловой гравитационной конвекции, сопровождающейся рециркуляцией и вихревыми течениями. В результате этого в объеме бака трансформатора, а также в горизонтальных и вертикальных каналах обмоток образуются устойчивые структуры в виде зигзагообразного и/или петлеобразного движения масла по группам горизонтальных каналов.

3. Зигзагообразное движение масла по группам горизонтальных каналов приводит к изменению скорости движения масла в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ м/с, а коэффициента теплоотдачи $0 \dots 110$ Вт/(м²·К).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рассальський О.М.* Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустановки: / М-во освіти і науки України, Запоріж. нац. техн. ун-т. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 144 с.
2. *Киш Л.* Нагрев и охлаждение трансформаторов /Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 36).
3. *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. – № 6. – С. 57 – 66.
4. *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.
5. *Круковский П.Г., Яцевский В.А., Конторович Л.Н., Иванков В.Ф., Хуторный В.М.* CFD - анализ теплового состояния обмоток масляных трансформаторов при критических размерах горизонтальных охлаждающих каналов // Промышленная теплотехника. – 2009. – №6. – С. 35 – 45.
6. *Николис Грегуар, Пригожин Илья.* Познание сложного. Введение = Exploring complexity. An introduction / Пер. с англ. В.Ф. Пастушенко, М.: URSS, изд-во ЛКИ, 2008. – 342 с.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. – 736 с.
8. *Приходько А.А.* Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. Киев: Наукова думка, 2003. – 380 с.
9. *Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. – 288.
10. *Мемедляев З.Н.* Тепломассообменные аппараты и реакторы с самоорганизацией потоков / З.Н. Мемедляев, П.Ф. Бондарь, А.А. Ильиных, В.М. Москалик // Хім. пром-сть України. – 2000. – № 1-2. – С. 72–75.
11. *Панченков А.Н.* Энтропийный механизм самоорганизации тепловых структур / А.Н. Панченков, М.Н. Борисюк // Систем. технології. Мат. пробл. техн. механіки. – Д., 2001. – № 2 [Спец. вип.] . – С. 123–127.
12. *Hong, S.W., Morcos, S.M., and Bergles, A.E.* Analytical and Experimental Results for Combined Forced and Free Laminar Convection in Horizontal Tubes," presented at the 5th International Heat Transfer Conference, Tokyo, Japan, September, Heat Transfer 1974, Vol. III, The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo. – P. 154–158.
13. *Одаренко Ю.М.* Розвиток методів подібності при теплообміні в охолоджуючих каналах обмоток трансформаторів для удосконалення їх теплового захисту. Автореферат дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук. Дніпродзержинськ. 2006. – 19 с.

Получено 03.02.2011 г.