

ПОВЕДЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И ЭЛЕКТРОАППАРАТУРЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. А. Воробьев

ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым ростом промышленности на севере и востоке Советского Союза, приобрело большое значение изучение поведения различных установок электрического тока в условиях низких температур¹⁾.

Расширенное совещание по электроизоляционным материалам, прошедшее в мае 1940 г. в Москве, указало на необходимость „усилить работы по исследованию поведения изоляции электрических машин и аппаратов в условиях эксплуатации“²⁾).

На необходимость форсированной работы по изучению поведения изоляции машин и аппаратов в условиях низких температур указала также в своих решениях конференция по борьбе с потерями энергии на ТЭЦ и аварийностью в сетях Кузбасса, созванная Томским индустриальным институтом в июне 1940 г.³⁾

В течение ряда лет автором данной статьи с сотрудниками высоковольтной лаборатории Сибирского физико-технического института, а затем в лаборатории высоких напряжений Томского индустриального института проводится систематическое изучение работы изоляции электрических аппаратов и самих аппаратов в условиях низких температур.

Холодные зимы 1938 и 1939 гг. еще раз подчеркнули важность этой научной проблемы для электроэнергетики районов Кузбасса, где температура опускалась до минус 57°C и в течение значительного времени держалась ниже минус 40°C .

Аппараты открытых электрических подстанций, трансформаторы, масляные выключатели и их изоляция, установленные на открытом воздухе, подвергаются воздействию низких температур.

Имеющаяся практика эксплуатации электроаппаратуры и электротехнических материалов, базирующаяся, главным образом, на опыте работы в районах с высокой среднегодовой температурой, не дает ответа на целый ряд вопросов о поведении аппаратов в условиях низких температур, в то время как эти вопросы остро интересуют практиков-эксплуатационников и конструкторов.

Современное состояние наших знаний о строении диэлектриков и их поведении в условиях работы позволяет предвидеть характер изменения некоторых свойств диэлектриков при понижении температуры. Однако практически представляет интерес знание количественной стороны этих изменений для технических диэлектриков, чего физические теории нам еще не дают.

Мы исследовали изменение электрофизических характеристик технических изоляционных материалов, трансформаторного масла, бумаги, лакокрасок, фарфора, компаундов и других материалов при понижении темпе-

ратуры. На основе полученных экспериментальных материалов о поведении диэлектриков при низких температурах были проведены исследования масляных трансформаторов и выключателей.

В данной статье сделана попытка изложить систематически часть полученных материалов.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Изменение плотности масла при понижении температуры представляет непосредственный интерес. Масло, плотность которого при низкой температуре будет больше плотности льда, при этих же температурах нежелательно применять в эксплуатации, так как в этом случае будет возможно всплывание льда и замыкание проводящих ток частей⁴⁾, хотя, следует заметить, что такому подъему будет препятствовать большая вязкость масел при низких температурах.

В наших опытах измерение плотности масел производилось методом пикнометра. На рис. 1 представлены некоторые полученные нами резуль-

таты. Как видно из рис. 1, температурный ход плотности различных масел является линейным, причем угловые коэффициенты для различных прямых различны.

Зависимость плотности жидкости от температуры дается формулой

$$d_t = \frac{d_0}{1 + \beta t}, \quad (1)$$

где d_0 — плотность жидкости при 0° , d_t — плотность жидкости при температуре t° и β — средний между 0° и t° коэффициент объемного расширения.

Согласно выражению (1), между величинами d_t и t зависимость гиперболическая. Полученная нами на опыте линейная зависимость указывает, очевидно, на неприменимость этой формулы к маслам, содержащим воду, или вымораживающиеся сравнительно при высоких температурах углеводороды. Температурная зависимость плотности такой двухфазной системы (жидкость + твердое тело), как видно из рис. 1, следует линейному закону и выражается уравнением

$$d_t = a + bt. \quad (2)$$

Для нормальной эксплуатации существенным является, чтобы плотность масел оставалась меньше плотности льда при соответствующих температурах. Плотность льда в интервале температур от 0° до минус 30°C изменяется от 0,917 до 0,919 г/см³, плотности же испытанных нами масел в этих интервалах менялись от 0,885 до 0,927 г/см³.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЯЗКОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Вязкость является одной из важнейших характеристик масел, идущих на заливку масляных выключателей. Масло с большой вязкостью не годно для этих аппаратов, так как в нем будет происходить слишком медленное размыкание тока и гашение дуги. Малая вязкость масел желательна и потому, что тогда взвешенные в масле частицы легче оседают на дно и, сле-

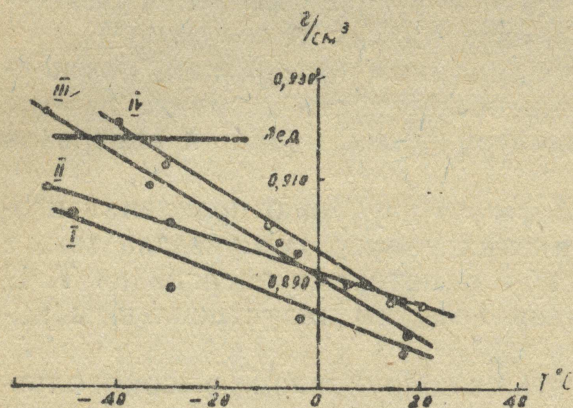


Рис. 1.

довательно, масло менее склонно к загрязнению. В менее вязких маслах под действием дуги образуется меньшее количество угля и они легче поддаются фильтрации.

Изучению природы вязкости жидкостей посвящено очень много работ. Обзор литературы по данному вопросу можно найти в статье А. А. Леонтьевой⁵⁾.

При теоретическом рассмотрении вопроса о температурной зависимости вязкости жидкостей эту зависимость обычно получают экспоненциальной. Однако в соответствующие формулы, описывающие изменение вязкости жидкости с изменением температуры, входит значительное число постоянных, неопределяемых из опыта. Теоретические формулы, правильно описывающие качественную сторону явления изменения вязкости простых жидкостей при изменении температуры, не дают возможности произвести количественных расчетов.

Для интересующей нас многофазной системы, которой будет являться масло при низких температурах после выкристаллизовывания воды и углеводородов, кипящих при сравнительно высоких температурах, формулы теории вязкости жидкостей пока неприменимы.

Измерение вязкости нами производилось по методу падения шарика с последующими вычислениями величины вязкости по формуле Стокса с поправкой Ланденбурга. Для этих измерений в нашей лаборатории было сконструировано несколько различных вискозиметров.

Измерение вязкости по способу Стокса было избрано потому, что этот способ лучше имитировал роль вязкости масла при работе масляного выключателя, чем способы измерения, основанные на протекании жидкости через трубку (метод Пуазейля и его видоизменения).

Для промеренных нами двенадцати масел получены два вида зависимости вязкости от температуры, представленные на рис. 2. и рис. 3. На рис. 2

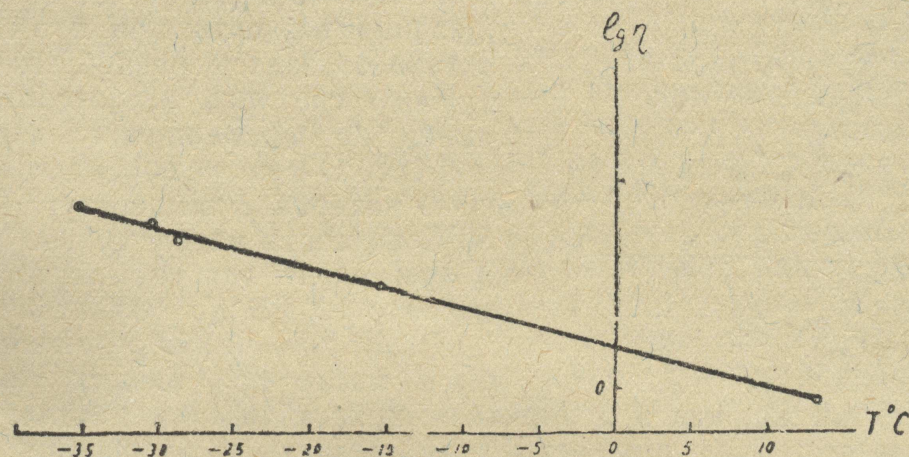


Рис. 2.

изображена зависимость логарифма вязкости, выраженной в паузах, от температуры. Такая зависимость получалась для очень светлого масла.

В исследованном интервале температур ($+13^{\circ}$ до -36°C) это масло дает увеличение вязкости в 150 раз. Вид зависимости вязкости от температуры укладывается в формулу

$$\eta = 0,5 e^{-0,025 t},$$

где η — вязкость в градусах Энглера. После введения в это масло воды, его вязкость при температуре -15°C заметно не изменилась, хотя пробивное напряжение при комнатной температуре упало с 28 кВ до 23 кВ по стандартному разряднику.

Вязкость остальных масел в зависимости от температуры изменяется иным, более сложным образом.

В исследованном интервале температур для некоторых масел наблюдалось изменение вязкости в 200000 раз. На рис. 3 представлена зависимость логарифма вязкости от температуры для одного из таких масел. Наличие сильной зависимости вязкости масел от температуры известно для парафинистых масел. Для них вязкость с понижением температуры вблизи нуля очень быстро растет. Взятые нами для опытов масла дают в этой области вплоть до температур минус 10° — 12°C линейную зависимость логарифма вязкости от температуры. При более низких температурах начинается очень быстрый рост вязкости, сильно зависящий от предварительного перемешивания масла. Ряд опытов с перемешиванием масел падающим шариком, мешалкой и другие показывают, что получающееся высокое значение вяз-

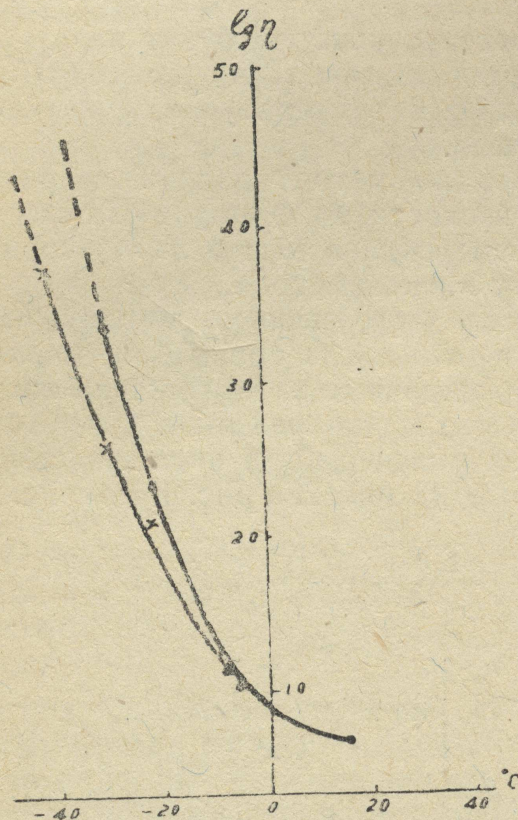


Рис. 3.

кости масел обязано своим происхождением наличию в масле некоторой структуры, которая перемешиванием нарушается, что ведет к уменьшению вязкости. На рис. 3 крестиками обозначена величина вязкости масла после перемешивания. Если перемешивание осуществить только самым измерительным шариком, то получается значение вязкости, уменьшающееся после каждого падения и устанавливающееся только после восьмидесятого падения. Как пример влияния перемешивания, можно указать, что для одного из темных масел вязкость при температуре минус 40°C до перемешивания была 200000°Э , после перемешивания вязкость при этой же температуре оказалась равной 10000°Э . Для другого светлого масла соответственно имели до перемешивания вязкость равной 1200°Э и после перемешивания 500°Э .

В интервале температур -40° до -50°C вязкость масел сильно возрастает, в том числе для упомянутого светлого масла с 1200°Э до 10000°Э .

Возможно, что образование структуры в масле при низких температурах происходит так же, как и дендритная кристаллизация металла в изложницах⁶⁾. Известно, что при остывании металла в изложнице кристаллы растут от стенок изложницы к центру, вследствие наличия в этом направлении градиента температуры. При охлаждении масла в стеклянном цилиндрическом стакане вплоть до установления температуры, одинаковой во всех точках, расположенных по радиусу, будет существовать некоторый градиент температуры. При этом длинные молекулы углеводородов выстраиваются в направлении градиента температуры, вследствие большой вязкости масел при этих температурах, молекулы сохраняют свой строй. Происходит псевдо-кристаллизация, образуется решетка, нарушаемая движущимся через масло телом. Охлаждение масел ниже температуры, при которой сказывается явление перемешивания, не сопровождается выпадением каких-либо осадков. Попытки обнаружить наличие структуры с помощью рассеяния света в масле не увенчались успехом.

Из литературы известно, что при определении температуры застывания масла оно должно находиться в покое. При перемешивании точка засты-

вания масла может понизиться на 3—5 градусов. Томсен⁷⁾ считает, что это явление связано с разрушением сетки твердых углеводородов, образующихся в масле при низких температурах. В частности, содержащийся в масле парафин выкристаллизовывается гнездами и увеличивает общую вязкость массы масла.

Для выявления возможной роли в образовании структуры в масле заряженных и поляризующихся молекул Н. А. Приходько были проделаны опыты по определению вязкости масел при низких температурах в присутствии электрического поля. Измерение производилось в плоском конденсаторе с расстоянием между пластинами 2,5 см: на пластины подавалось 10—12 кВ постоянного напряжения.

Результаты этих измерений представлены в таблице № 1.

Таблица № 1

Температура в °С	Вязкость масла без поля в °Э	Вязкость перемешанного масла в °Э	Вязкость масла, охлажденного в поле. Измерения без поля в °Э	Вязкость масла, находящегося 10 мин. в поле после перемешивания в °Э	Вязкость масла в поле сразу же после перемешивания в °Э
—35	1800	700	2160	—	—
—32		450		1200	
—28		300		700	
—25		210		560	
—23		200			420
—22	15	175	15		385
— 3		15		15	15
12		6		6	6

Как видно из таблицы 1, измерение вязкости в присутствии электрического поля дает сразу высокие значения вязкости, более высокие, чем измерение в отсутствии электрического поля. Причем измерения вязкости в электрическом поле, произведенные сразу после перемешивания, дают высокие значения вязкости, что указывает на большую скорость процессов, протекающих в масле в присутствии электрического поля и приводящих к высокой вязкости. Влияние поля на вязкость сказывается при температурах ниже -18° и -20°C , т. е. приблизительно при тех же температурах, при которых начинает проявляться структурная вязкость. При более низких напряжениях, например, 80 в, влияния электрического поля не было заметно. Дальнейшие опыты показали, что растворение в масле некоторых веществ приводит к уничтожению структурной вязкости при низких температурах⁸⁾.

В литературе существуют указания на возможность уменьшения вязкости масла при низких температурах с помощью тепловой обработки⁹⁾ масел. Считается, что основным фактором, влияющим на температуру застывания масел, является парафин, присутствующий почти во всех минеральных маслах. Поэтому, в зависимости от количества парафина в минеральном масле и его состояния, различные масла будут иметь разную температуру застывания. Кроме того, на температуру застывания будут влиять и остальные компоненты масел, так как в первом приближении является средним арифметическим из температур застывания компонентом. На температуру застывания также сильно влияет присутствие поверхностно активных и смолистых веществ, которые, благодаря адсорбции на поверхности центров кристаллизации парафина, могут оказать влияние на температуру застывания, находясь в масле даже в малых количествах. Для таких масел имеется зависимость вязкости вблизи точки застывания от предварительного

подогрева, причем она проявляется тем сильнее, чем ниже температура, при которой производится измерение вязкости. Предварительный прогрев масел может снижать вязкость в два раза. Это явление, связанное с одновременным присутствием в маслах твердых углеводородов парафинового ряда и смолистых веществ, объясняется различными формами кристаллизации парафина после подогрева и способностью смол при определенных условиях задерживать ее.

Н. А. Приходько было проверено влияние предварительного прогрева на вязкость масла при низкой температуре. Масло перед измерением было прогрето до 80°C и затем охлаждено до минус 29°C . Вязкость этого масла при температуре минус 29°C до перемешивания оказалась равной 350°Э и соответственно после перемешивания 240°Э . Если масло после прогрева выдержать сутки, то значения вязкости для такого масла оказываются такими же, как и для непрогретого масла, а именно соответственно до перемешивания 220°Э и 350°Э после перемешивания, что, очевидно, и следовало ожидать, так как подобное нагревание масло во время его производства и эксплуатации претерпевает неоднократно. Таким образом, тепловая обработка масел дает только временный эффект понижения вязкости.

Обращает внимание тот факт, что точка застывания исследованных масел, определенная согласно норм, составляет минус 48° — 55°C и удовлетворяет нормам. Однако, начиная с температуры минус 35°C благодаря наличию структурной вязкости, эти масла имеют такую большую вязкость, что употребляться для заливки масляных выключателей уже не могут. Принятые в настоящее время методы измерения вязкости, основанные на наблюдении истечения масел из труб под давлением, дают неправильное представление об истинной вязкости масел при низких температурах. При этих измерениях происходит перемешивание масел, приводящее к уничтожению структурной вязкости, что, согласно нашим данным, может понизить вязкость в 10—15 раз. Поэтому нам кажется, что в нормы испытаний масел целесообразно ввести испытание вязкости методом, дающим возможность замерять полное значение вязкости, включая и структурную вязкость. Точка застывания масел, определяемая с помощью рекомендуемого нормами метода пробирки, не может характеризовать пригодность масел для использования их при низких температурах.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МАСЕЛ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температурная зависимость пробивного напряжения масел хорошо изучена для температур выше нуля¹⁰⁾. Данные о пробивных напряжениях масел отечественного происхождения при низких температурах были противоречивы. Можно привести, например, указание И. А. Глозмана¹⁰⁾ о том, что имеются отдельные данные о снижении электрической прочности трансформаторного масла при низких температурах.

Пробой трансформаторного масла технической очистки представляет сложное явление и может быть вызван ионизационными явлениями в воздушных включениях, тепловыми процессами, возникающими в масле, находящемся в электрическом поле, и рядом других причин¹²⁾.

При понижении температуры масла и возрастании вязкости его электропроводность должна уменьшаться, притом будут уменьшаться тепловые потери в масле и затрудняться развитие тепловой формы пробоя. Поэтому при понижении температуры следует ожидать возрастания пробивного напряжения.

В наших опытах пробой масла производился между стандартными электродами при расстоянии между ними, равном 1 мм. Полученные дан-

ные приведены на рис. 4. Кривая I представляет зависимость пробивного напряжения на импульсах от температуры для масла № 12, не имеющего структурной вязкости. Кривая II дает эту же зависимость для темного масла, обладающего структурной вязкостью. Ход зависимости для обоих масел совершенно одинаков. Кривые III и V соответственно представляют результаты испытаний на переменном напряжении для масла № 12 и масла № 11. Кривая IV относится к пробоем на переменном напряжении предварительно осушенного масла № 11. Для него отсутствует скачок пробивного напряжения при переходе через нуль.

Таким образом, измерение температурной зависимости электрической прочности показало следующее: при переходе через 0°C электрическая прочность масел повышается скачком; причем при пробое на импульсах величина этого повышения меньше, на переменном напряжении повышение относительно больше. Скачок электрической прочности при переходе через 0°C связан с вымерзанием эмульгированной воды. Для хорошо осушенного масла этот скачок отсутствует.

После вымерзания эмульгированной воды различные масла все же имеют несколько разную прочность, что, очевидно, связано с растворенной водой, находящейся в состоянии молекулярного дробления.

При понижении температуры ниже минус 25°C опять начинается повышение электрической прочности. Это увеличение вряд ли полностью

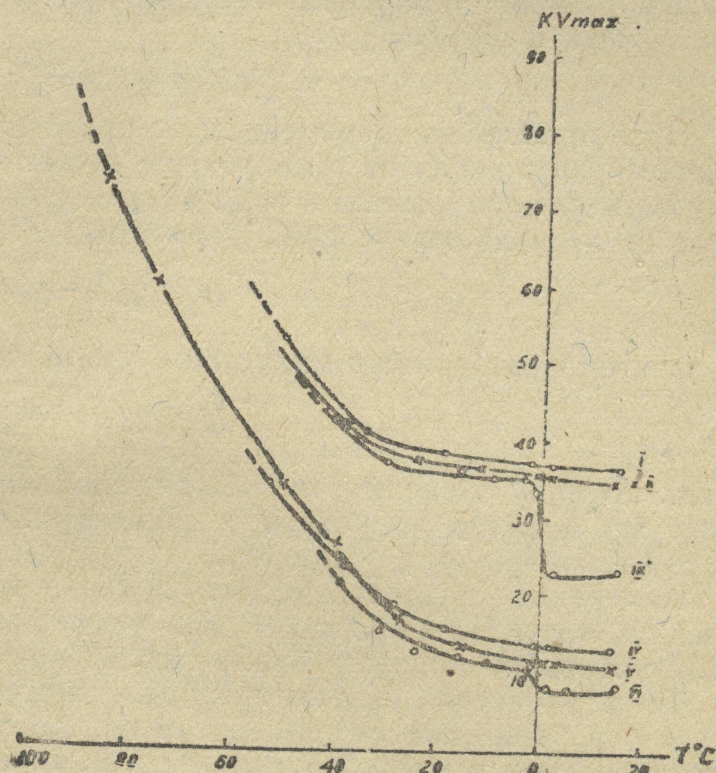


Рис. 4.

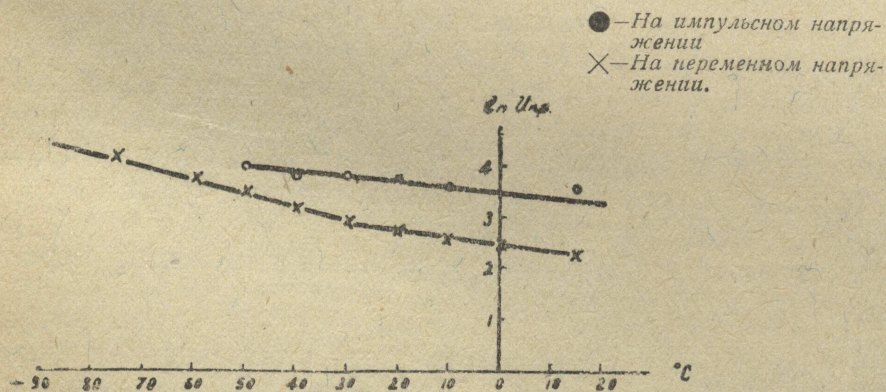


Рис. 5.

связь между величиной логарифма пробивного напряжения и температурой диэлектрика.

На рис. 5 изображена зависимость логарифма пробивного напряжения от температуры для масел, представленных на рис. 4 кривыми I и VI. На рис. 5 кружочками нанесены значения логарифма пробивных напряжений

обусловлено вязкостью, как это думает, например, Гемант.¹³⁾

Вообще обращает внимание быстрый рост пробивного напряжения масел с понижением температуры в области низких температур.

Известно, что при тепловом пробое мы имеем линейную

на импульсах с длиной хвоста порядка 10^{-4} сек.; крестиками нанесены значения логарифма пробивных напряжений на переменном напряжении. Как видно из рис. 5, для обоих видов напряжений зависимость между указанными величинами получилась линейной. Для импульсных напряжений зависимость между пробивным напряжением и температурой для исследованных масел при температуре ниже нуля хорошо выражается следующей формулой

$$U = 36 \varepsilon^{-0,1 t} \quad (4)$$

При пробое на переменном напряжении зависимость величины пробивного напряжения от температуры может быть представлена или в виде двучленной формулы или в виде двух отдельных формул, а именно в интервале от нуля до минус 30°C формулой

$$U = 25 \varepsilon^{-0,01 t}$$

и для температур ниже минус 30°C формулой

$$U = 28 \varepsilon^{-0,291 t} \quad (6)$$

Судя по виду зависимости между пробивным напряжением и температурой, мы должны допустить в данном интервале низких температур для масел тепловую форму пробоя.

Измерения диэлектрических потерь, произведенные на мосте Шеринга Н. А. Приходко¹³⁾ для различных масел, показали уменьшение угла потерь по показательному закону при понижении температуры.

Такое изменение угла потерь при понижении температуры указывает на то, что в этой области температур при промышленной частоте диэлектрические потери в масле обусловлены электропроводностью.

Таким образом, изучение температурного хода пробивного напряжения масла и диэлектрических потерь дают результаты, указывающие на то, что при низких температурах в масле имеют место диэлектрические потери, обусловленные проводимостью, и тепловой пробой.

Интересно отметить, что для некоторых масел в области температур минус 50 — 60°C появляется максимум угла диэлектрических потерь. Если величина угла потерь при 0° равна $0,08$, то при этом максимум $\text{tg } \delta$ имеет значение $0,068$, т. е. достигает 85% величины. Значения $\text{tg } \delta$ при температуре 0°C .

М. Михайлов и Г. Соя¹⁵⁾, изучавшие температурную зависимость $\text{tg } \delta$ для некоторых диэлектриков, получили максимум $\text{tg } \delta$ при температуре минус 60°C для чистого льда, сухого прессшпана, бумаги, шеллака, целлофана и для смеси канифоли с ликоподием. Измерения производились при частоте 50 Н. По мнению этих авторов, в настоящее время можно утверждать, что этот максимум свойственен всем веществам, содержащим гидроксильные группы. Максимум угла потерь, следовательно, будет иметь место и для пластмасс, содержащих целлюлозу.

При высоких частотах этот максимум, обусловленный диполями, перемещается в область нормальных температур.

ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Экспериментальные данные, изложенные выше, показывают, что пробивное напряжение масел при понижении температуры ниже нуля всегда увеличивается, причем зависимость между этими величинами подчиняется уравнению:

$$U = U_0 \varepsilon^{-at} \quad (7)$$

Постоянные, входящие в формулу (7), различны при пробое масла на импульсах и на переменном напряжении.

Для более полного суждения о работе аппарата под маслом в условиях низких температур, необходимо знать, как будут изменяться свойства других диэлектриков, использованных в этих аппаратах.

Н. А. Приходько¹⁴⁾ производил пробой высоковольтного фарфора при разных температурах в однородном электрическом поле на импульсах. Как показывают данные этих опытов, представленные на рис. 6, пробивное напряжение фарфора в исследованном интервале температур от температуры не зависит.

В. А. Воробьев¹⁶⁾ изучал пробой бумажной изоляции в зависимости от температуры. В этих опытах были взяты следующие материалы:

1. Прессшпан толщиной 0,8 мм с удельн. весом 1,38, в дальнейшем обозначаемый прессшпан А. Этот прессшпан был вынут из масляного трансформатора после длительной работы.

2. Прессшпан толщиной 0,56 мм с удельным весом 1,32, обозначаемый дальше прессшпан В.

3. Кабельная бумага КВ—17, толщиной 0,17 мм.

4. Лакоткань желтая, толщиной 0,20 мм.

5. Пертинакс.

Измерения производились на переменном напряжении и импульсах с длиной хвоста порядка 10^{-4} сек.

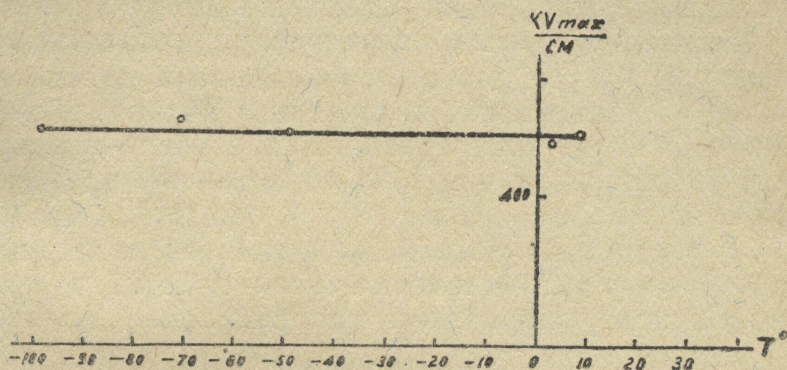
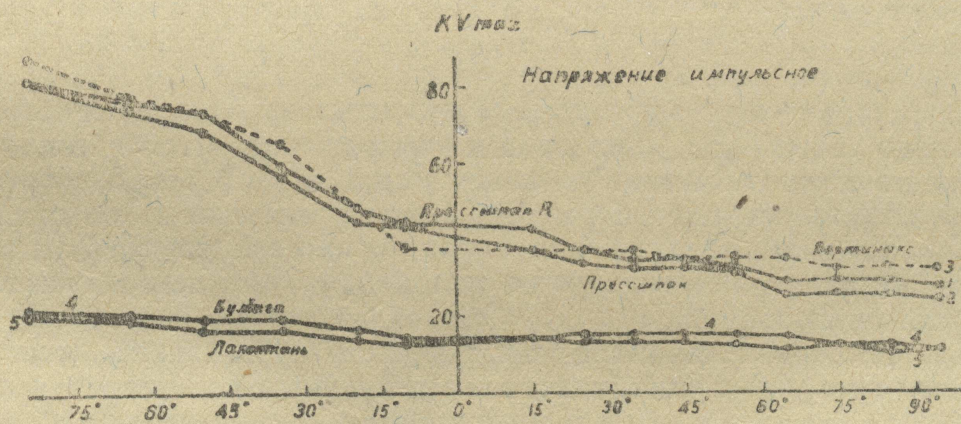


Рис. 6 Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора в однородном поле на импульсах

Рис. 6.



Зависимость пробивных напряжений бумажной изоляции от температуры

Рис. 7.

Пертинакс пробивался в условиях однородного поля, которое получалось в образцах, имевших сферическую выточку.

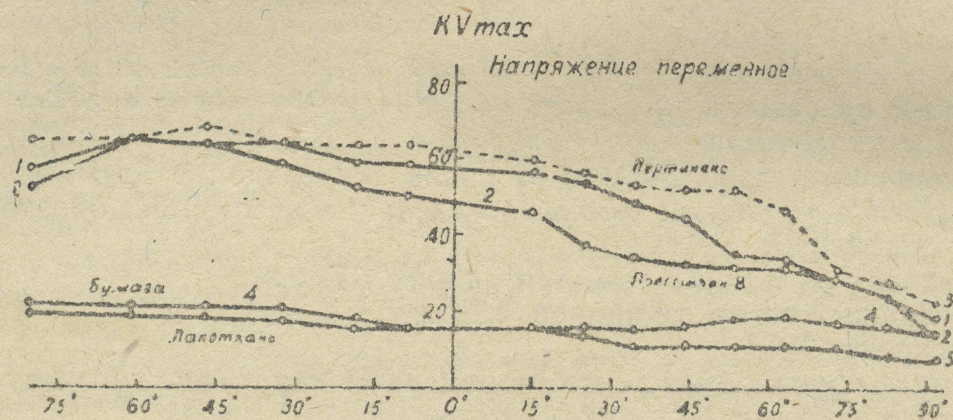
При пробое бумаги, прессшпана В, лакоткани—в качестве электродов употреблялись плоскость (круг диаметром 25 мм с закругленными краями) и полусфера диаметром 25 мм. Прессшпан А, на переменном напряжении, между указанными электродами пробить было нельзя вследствие больших поверхностных разрядов, поэтому он пробивался в электрическом поле—острие против плоскости. Образцы бумаги и прессшпана перед испытанием

предварительно проваривались в хорошо осушенном трансформаторном масле при температуре 80—90°C в течение 4—5 часов. Охлаждение образцов и поддержание низкой температуры производились с помощью криостата, конструкция которого была разработана у нас в лаборатории¹⁷⁾. Пробой производился в трансформаторном масле. Результаты этих измерений представлены на рис. 7 и 8.

На рис. 7 изображена зависимость между величиной пробивного напряжения и температурой на переменном напряжении. На рис. 8 представлена зависимость между теми же величинами на импульсном напряжении.

Как видно, в обоих случаях пробивное напряжение с понижением температуры растет для всех испытанных материалов. Для прессшпана А в масле в практически интересном интервале низких температур от 0° до минус 60°C пробивное напряжение увеличивается по сравнению с пробивным напряжением при 15°C на 15%—для прессшпана В на 40%, для пертинакса на 9%, бумаги на 30% и лакоткани на 20%.

Пробивное напряжение волокнистой изоляции определяется: во-первых, характером распределения электрического поля в волокне и порах. На переменном напряжении распределение поля будет зависеть от соотно-



Зависимость пробивных напряжений бумажной изоляции от температуры.

Рис. 8.

шения диэлектрических коэффициентов вещества волокна и материалов, заполняющего поры. На постоянном напряжении распределение поля будет зависеть от соотношения удельных проводимостей вещества волокна и материала, заполняющего поры. Во-вторых, эффектом повышения пробивного напряжения воздуха или масла, заполняющего каналы в волокнистой изоляции, сравнительно со сплошным слоем такой же толщины этих же материалов.

С целью выяснения характера пробоя было произведено исследование зависимости логарифма пробивного напряжения от температуры. Оказалось, что для прессшпана А на переменном токе логарифм пробивного напряжения при понижении температуры растет по линейному закону, т. е. удовлетворяется зависимость, характерная для тепловой формы пробоя. Для прессшпана В до температуры 55°C зависимость между величиной пробивного напряжения в киловольтах и температурой описывается уравнением (7), где $U_0 = 48$, $\alpha = 0,077$. При температурах выше 55° вид зависимости сохраняется, но величины коэффициентов изменяются и зависимость становится более сильной. Для пертинакса до температуры 55°C пробой является электрическим, а при более высоких температурах тепловым.

При пробое на импульсах пробивное напряжение оказывается связанным с температурой диэлектрика также уравнением (7). В этом случае для прессшпана А величина U_0 равна 40, для прессшпана В соответственно

43 и для пертинакса 37. Величина α для всех диэлектриков оказалась одинаковой и равной 0,91.

Если сравнить зависимость пробивного напряжения от температуры при пробое на импульсах для масел, с одной стороны, и для прессшпана и пертинакса, с другой, то эта зависимость оказывается одинаковой и выражается формулой (7). Это обстоятельство позволяет считать, что пробой указанных волокнистых диэлектриков связан с пробоем масла в порах этих диэлектриков и с поверхностными разрядами в масле.

Для всех исследованных диэлектриков выполняется основная зависимость, характерная для теплового пробоя, поэтому можно думать, что для всех исследованных диэлектриков при низких температурах мы имеем дело с тепловой формой пробоя, за исключением пертинакса, для которого ясно выраженный тепловой пробой начинается только при температурах выше 55°C .

Исходя из приводимых данных по изучению разрядных напряжений в масле при понижении температуры, можно ожидать, что начальные напряжения в масле при понижении температуры, а также

разрядные напряжения по поверхности твердых диэлектриков будут расти.

Опыты по измерению начальных напряжений в масле при низких температурах были проведены Н. Ф. Рыжковой¹⁸⁾. Пользуясь фотографическим методом, она определяла напряжение появления короны у острия в электрическом поле, острие против плоскости при погружении электродов в масло. Результаты этих измерений представлены на рис. 9, где по оси ординат отложено напряжение появления короны, а по оси абсцисс температура масла. В этих опытах употреблялось переменное напряжение. Как видно из рис. 9, с понижением температуры начальные напряжения в масле возрастают.

Приведенные выше результаты исследований аппаратной изоляции показывают, что электрическая прочность волокнистых материалов, пропитанных маслом, и самого трансформаторного масла с понижением температуры растет, электрическая прочность фарфора от температуры не зависит. Рассматривая проблему эксплуатации аппаратов при низких температурах, мы можем сказать, что с точки зрения электрической прочности изоляции аппаратов эта эксплуатация вполне возможна.

МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ МАСС.

Для заливки проходных изоляторов аппаратов и кабельных муфт, как известно, употребляются заливочные массы.

Нашей электропромышленностью употребляются четыре марки заливочных масс: МБ—80, МБ—100, МК—55 и Э—3. Масса МК—55 изготавливается на основе канифоли, а остальные из указанных масс на основе битума¹⁹⁾.

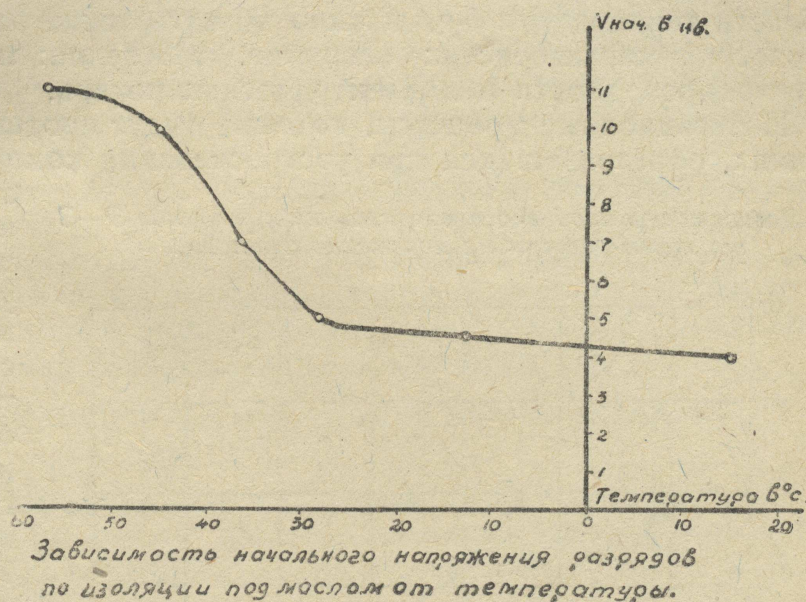


Рис. 9.

Мы ²⁰⁾ подробно изучали свойства массы Э—3 в интервале температур от 150°C минус 60°C. Этот компаунд, выпускаемый заводом „Электроаппарат“, употребляется для заливки втулок ВМ—35 и МКП—76. По нашим определениям температура растрескивания T_g этой массы оказалась около минус 37°C.

Известно, ¹⁹⁾ что в области T_g —температуры превращения компаунда в твердое тело, наблюдается резкое изменение диэлектрической проницаемости в постоянном электрическом поле, теплоемкости и коэффициента расширения.

Мы полагаем, что нарушение сплошности вещества, имеющее место в области температуры T_g , должно вызвать также изменение других диэлектрических характеристик вещества, а именно: пробивного напряжения, электропроводности и диэлектрических потерь.

Ионизационные процессы, которые будут протекать в воздушных включениях, образовавшихся при растрескивании компаунда, могут привести к

Зависимость пробивного напряжения компаунда Э—3 от температуры на переменном напряжении

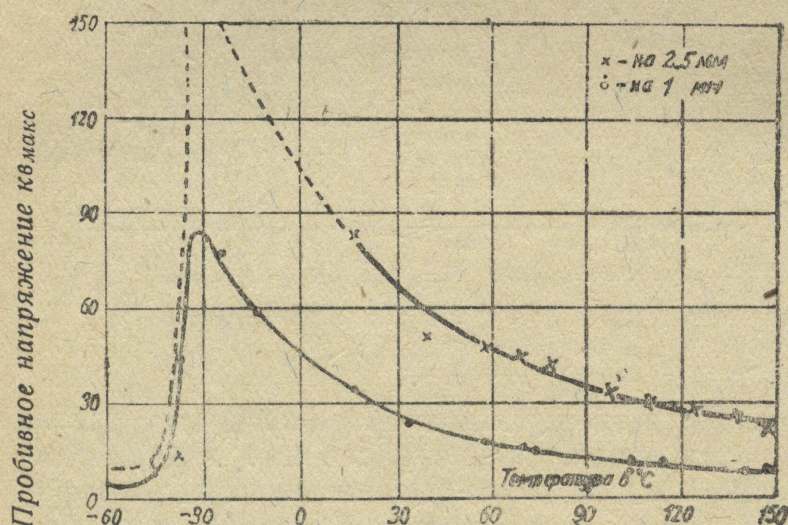


Рис. 10.

Зависимость пробивного напряжения от температуры при расстоянии между электродами, равном 2,5 мм, построена на рис. 10 по крестикам; аналогичная зависимость для расстояния между электродами, равная 1 мм, построена по кружочкам.

Наличие резкого изменения в температурной зависимости пробивного напряжения в области T_g , наблюдаемое при пробое на переменном и импульсном напряжениях, позволяет точно определять температуру растрескивания компаунда.

Обычно T_g компаунда определяют или визуальным, наблюдая появление трещин на поверхности охлаждаемого компаунда, чем пользовались и мы в своих определениях, или на слух. Одним из простых способов определения T_g является метод Таммана. Он состоит в следующем: 1—2 см³ вещества, расплавленного в пробирке, подвергается медленному охлаждению. При достижении температуры T_g легкое прикосновение компаунда стеклянной палочкой вызывает растрескивание вещества по всему объему, что можно заметить по характерному звуку. Таким образом, применяемые методы определения температуры хотя и достаточно просты, но они субъективны. Определение температуры T_g из температурной зависимости пробивного напряжения значительно сложнее, но зато одновременно дает нам и количественный результат, показывающий степень понижения

значительному уменьшению пробивного напряжения компаунда и к увеличению электропроводности и диэлектрических потерь. Измерение температурного хода пробивного напряжения, произведенное студентом Н. А. Снегиревым ²⁰⁾, показало, что в области T_g действительно наблюдается резкое уменьшение пробивного напряжения. На рис. 10 приводится полученная им зависимость при пробое на переменном токе.

Пробой компаунда Э—3 производился в стандартном разряднике.

диэлектрических свойств компаунда при понижении температуры ниже T_g , что является необходимым для практики.

Приведенные выше данные показывают, что компаунд Э—З, считающийся морозостойким, оказывается таковым только до температуры минус 35°C .

Для заливки кабельных муфт 6-киловольтных кабельных линий употребляется заливочная масса из 70% канифоли и 30% автола. Электрофизические свойства этого материала были подробно изучены в нашей лаборатории А. К. Красиным и В. Ф. Божко²¹⁾. В частности, проведенное ими испытание морозостойкости этого компаунда показало, что при испытании в фарфоровом сосуде растрескивание компаунда начинается уже при температуре минус 20°C . При испытании в чугунном сосуде компаунд дает растрескивание у стенок и поперек сосуда при температуре $22\text{—}25^{\circ}\text{C}$. Таким образом, и эта заливочная масса, несмотря на ряд положительных свойств, не может быть рекомендована для использования при низких температурах.

Приведенные выше результаты исследования двух заливных компаундов, употребляемых как морозостойкие, показывают, что их морозостойкость практически не удовлетворительна. Эти данные подтверждают решение Всесоюзного совещания по электроизоляции, в резолюциях которого мы читаем.... „Особое внимание должно быть уделено вопросу разработки и организации производства морозостойких компаундов“²²⁾.

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.

Вопрос о работе трансформаторов в условиях низких температур тесно связан с вопросами использования полной мощности трансформаторов и возможности их перегрузки, которым за последнее время уделяется большое внимание.

Включение под нагрузку трансформатора с застывшим маслом может вызвать перегрев масла вблизи обмоток, так как теплоотвод, вследствие отсутствия конвекции, в первый момент после включения, будет мал. Таким образом, изоляция скажется в тех же условиях, что и при перегрузке трансформатора. С другой стороны, при низкой температуре окружающего воздуха будет хороший теплоотвод от бака трансформатора и, естественно, возникает вопрос об увеличении допускаемой нагрузки для данного аппарата. Что касается вопроса о перегреве изоляции при затрудненном теплоотводе загустевшим маслом, то немногочисленные литературные данные²³⁾ противоречивы, а соответствующие исследования произведены на моделях в искусственных условиях. По второму поставленному вопросу относительно перегрузки имеются указания ОСТ 2524, по которым для районов со средней годовой температурой ниже 4°C допускается перегрузка трансформатора по 1% на каждый градус, начиная от $+35^{\circ}\text{C}$, но не более 140% в целом. Нагрузка 140% согласно ОСТ будет достигнута при температуре окружающего воздуха минус 5°C .

Какова допустимая длительная и кратковременная перегрузка трансформатора в условиях сибирской зимы, когда продолжительное время температура держится ниже минус 30° ? Существующий ОСТ и проект нового ОСТ²⁴⁾ на эти вопросы исчерпывающих ответов не дают.

По согласованию с рядом сибирских организаций (Кемеровский АТЗ, Кузбассет и др.) высоковольтной лабораторией СФТИ было произведено экспериментальное исследование теплового режима масляного трансформатора²⁵⁾, ниже мы приводим кратко основные результаты этих исследований.

Измерения были сделаны научными сотрудниками лаборатории Е. К. Завадовской и А. К. Красиным, с трансформатором мощностью 100 кВа

типа ТМ 100/6 с обмотками 1000/400 вольт. В условиях искусственного и естественного охлаждения были произведены следующие наблюдения: 1) разогревание трансформатора при включении в режиме короткого замыкания; 2) разогревание трансформатора, включенного в нормальном режиме; 3) разогревание трансформатора, включенного с нагрузкой 160%; 4) разогревание трансформатора, включенного под нагрузку 160% с застывшим маслом; 5) тепловой режим при длительной работе нагруженного трансформатора, включенного под нагрузку при низкой температуре окружающего воздуха; 6) исследование теплового режима трансформаторов на моделях.

Существующие формулы для расчета теплового режима трансформатора²⁶⁾ в нашем случае не могли быть использованы, так как нас интересовала истинная температура в ряде точек трансформатора, условия теплоотвода от которых очень сложны и не могли быть учтены достаточно точно. Поэтому пришлось прибегнуть к экспериментальному исследованию теплового режима трансформатора в разных условиях.

Наблюдение за температурой в трансформаторе производилось с помощью железо-константановых термопар, включаемых по дифференциальному способу. Под наблюдением находились следующие точки трансформатора:

1. Ребро трансформатора.
2. Масло на высоте середины катушки на расстоянии 20 мм от ВВ обмотки.
3. Промежутки между ВВ и НВ обмотками.
4. Верхний виток НВ обмотки.
5. Нижний виток НВ обмотки.
6. Верхняя часть сердечника.
7. Масло на высоте середины катушки на расстоянии 10 мм от ВВ обмотки.
8. Масло на высоте середины катушки на расстоянии 10 мм от ВВ обмотки.
9. Поверхность ВВ обмотки на высоте середины катушки.

t_1 — температура воздуха на высоте верхнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора.

t_2 — температура воздуха на высоте нижнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора.

Расположение термопар указано на рис. 11.

Необходимо указать, что п. 1, 2, 3, и 4, из указанных выше измерений, были произведены при помещении трансформатора в специальную камеру из котельного железа, стенки которой имели хорошую теплоизоляцию от окружающего воздуха. В этой камере (криостате) трансформатор был подвергнут искусственному охлаждению. Наблюдение по п. 5 производилось над трансформатором, находящимся в условиях естественного охлаждения.

1. Разогрев трансформатора при включении в режиме короткого замыкания. Сушка трансформатора ТКЗ продолжалась 14 часов; наблюдение за температурой велось 9 часов. Наивысшая температура, замеренная в трансформаторе, не поднималась выше 47°C, до этой температуры нагрелся верхний виток низковольтной обмотки. Через шесть с половиной часов такой же максимальной температуры достигли верхние слои масла. Затем температура установилась и в дальнейшем не повышалась. Таким образом, при сушке трансформатора ТКЗ—опасного перегрева изоляции не наблюдалось.

2. Разогрев трансформатора при включении его в нормальном режиме.

После включения в течение 50 мин. наибольшую температуру имел виток низковольтной обмотки. Затем такой же температуры достиг сердечник, который в продолжении трех часов обладал наиболее высокой температурой. К концу наблюдения наивысшая температура была на поверх-

ности высоковольтной обмотки и составляла 65°C. Наблюдение продолжалось 6 часов, в течение этого времени температура в трансформаторе установилась.

3. Наблюдение за разогревом трансформатора при включении его с нагрузкой 160 %.

Нагрузка трансформатора 160% была выбрана по соображениям испытания трансформатора в условиях работы более жестких, чем допустимые, согласно ОСТ. В начале эти наблюдения были проведены при включении трансформатора при нормальной температуре. Как и в предыдущих опытах, наиболее нагретой точкой оказалась точка на поверхности высоковольтной обмотки. Однако, необходимо заметить, что по данным П. М. Тихомирова²⁶⁾, наблюдавшего разогрев обмотки в масле, наиболее нагретым местом в обмотке является область, расположенная внутри обмотки на расстоянии $\frac{2}{3}$ от внешней поверхности обмотки. Эта область имеет температуру на 25° выше температуры внешней поверхности обмотки. При учете этого обстоятельства можно считать, что через 1 час 55 минут после включения трансформатора под перегрузку была достигнута предельная температура, так как в этот момент температура поверхности высоковольтной обмотки составляла 70°C, следовательно, внутри обмотки температура была 95°C. Температура в криостате (на середине высоты) к этому времени поднялась до 34°C. Затем трансформатор был охлажден в среднем до температуры минус 50°C и с застывшим маслом включен под нагрузку 160%.

После включения нагрузки начинается быстрый разогрев масла. Особенно быстро поднимается температура в каналах между изоляционным цилиндром и обмоткой. Разогрев трансформатора при включении его с нагрузкой 160% можно видеть на рис. 12 и 13. Через 20 минут после включения наивысшей температуры достигает верхний виток низковольтной обмотки, который в последующем остается наиболее нагретым местом в трансформаторе. Как видно из рис. 12 и 13, наибольший нагрев при пуске трансформатора в этих условиях был достигнут через 40 минут после его включения, при этом максимальная температура была равна 47°C, затем после некоторого понижения температура устанавливается и держится постоянной. Этот установившийся режим нарушается при нагреве воздуха в криостате до температуры, близкой к 0°C. После чего начинается общее повышение температуры, аналогичное тому, которое мы имели в предыдущем опыте при включении трансформатора под нагрузку 160% при нормальной температуре.

РАСПОЛОЖЕНИЕ ТЕРМОПАР

1—в ребре трансформатора; 2—на расстоянии 20 мм от ВВ обмотки; 3—между НВ и ВВ обмотками; 4—верхний виток НВ обмотки; 5—нижний виток НВ обмотки; 6—сердечник трансформатора; 7—на расстоянии 10 мм от ВВ обмотки; 8—на расстоянии 5 мм от ВВ обмотки; 9—поверхность ВВ обмотки.

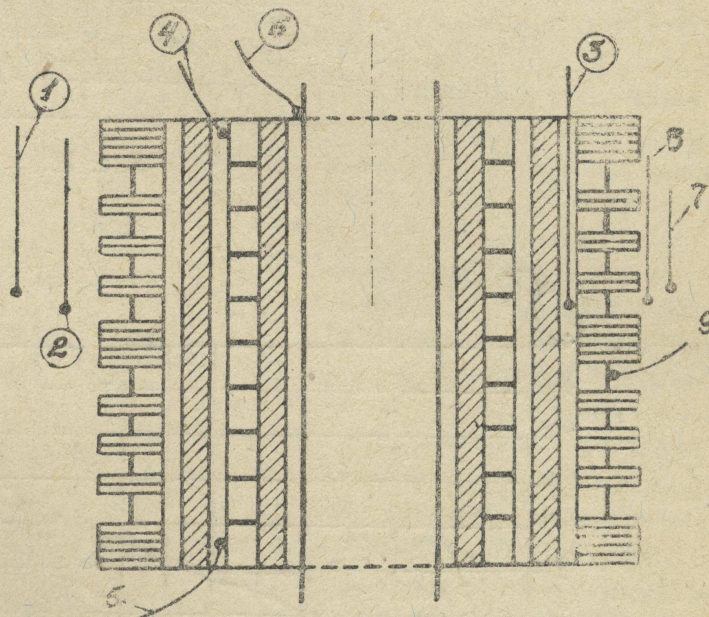


Рис. 11.

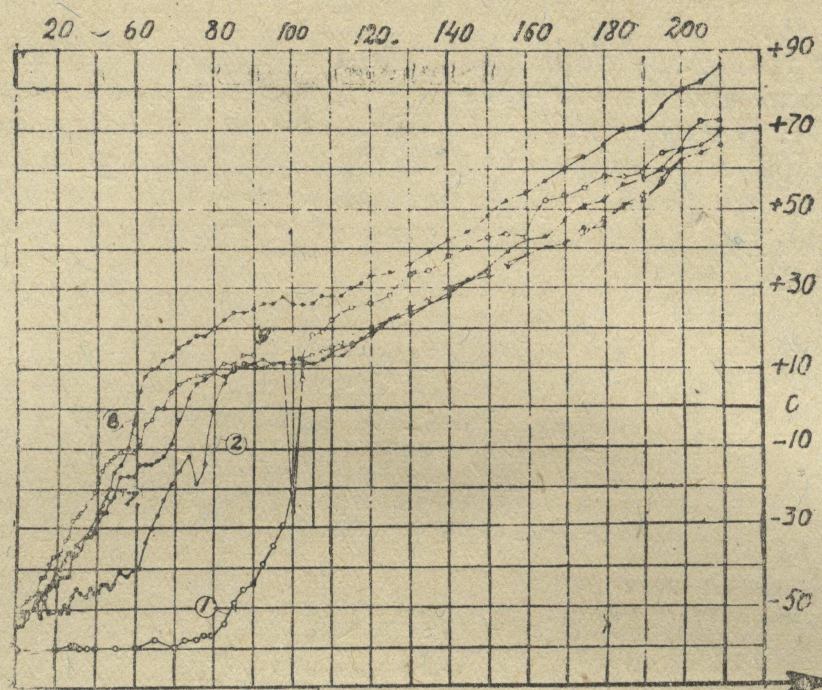


Рис. 12.

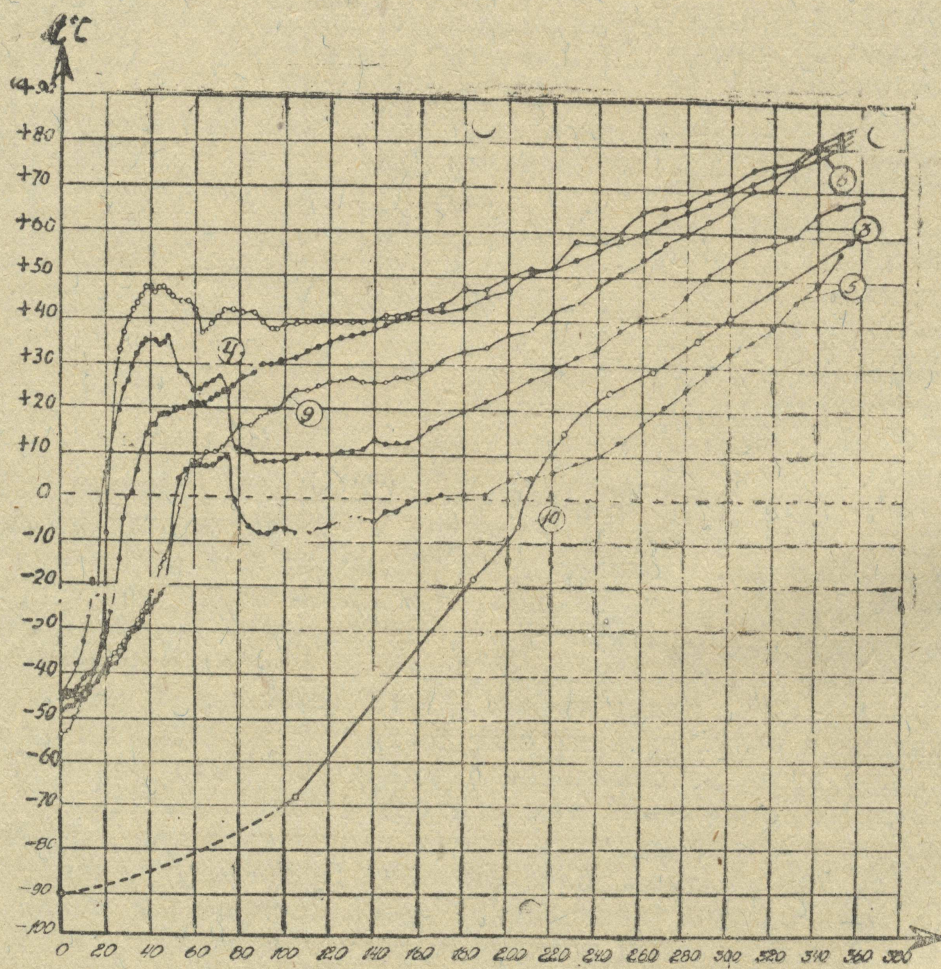


Рис. 13.

По данным описанных выше опытов можно сделать заключение, что при включении под перегрузку трансформатора с застывшим маслом, опасного перегрева изоляции нет, поэтому масляные трансформаторы можно включать под нагрузку из холодного резерва, без предварительных мероприятий по их обогреву.

Поскольку загустевание масла в трансформаторе при низкой температуре не создает опасности перегрева изоляции, а выделяющееся в обмотке тепло быстро разогревает масло, для заливки трансформаторов, предназначенных к работе в районах с низкой температурой окружающей среды, можно употреблять изоляционные масла обычных марок, а не особо холодностойкие. Таковы результаты некоторых опытов с трансформатором, кожух которого снабжен ребристой поверхностью.

Что касается трансформаторов с другими типами охладителей (трубчатыми, змеевиковыми), то следует думать, что их разогрев будет идти более сложно, и для них следовало бы также провести экспериментальные исследования, аналогичные описанным.

Из рассмотрения рис. 12 и 13 видно, что трансформатор с перегрузкой 160% может работать значительное время. Однако в этих условиях опыта теплоотвод от кожуха был значительно меньше, чем в условиях естественного охлаждения при низкой температуре окружающего воздуха.

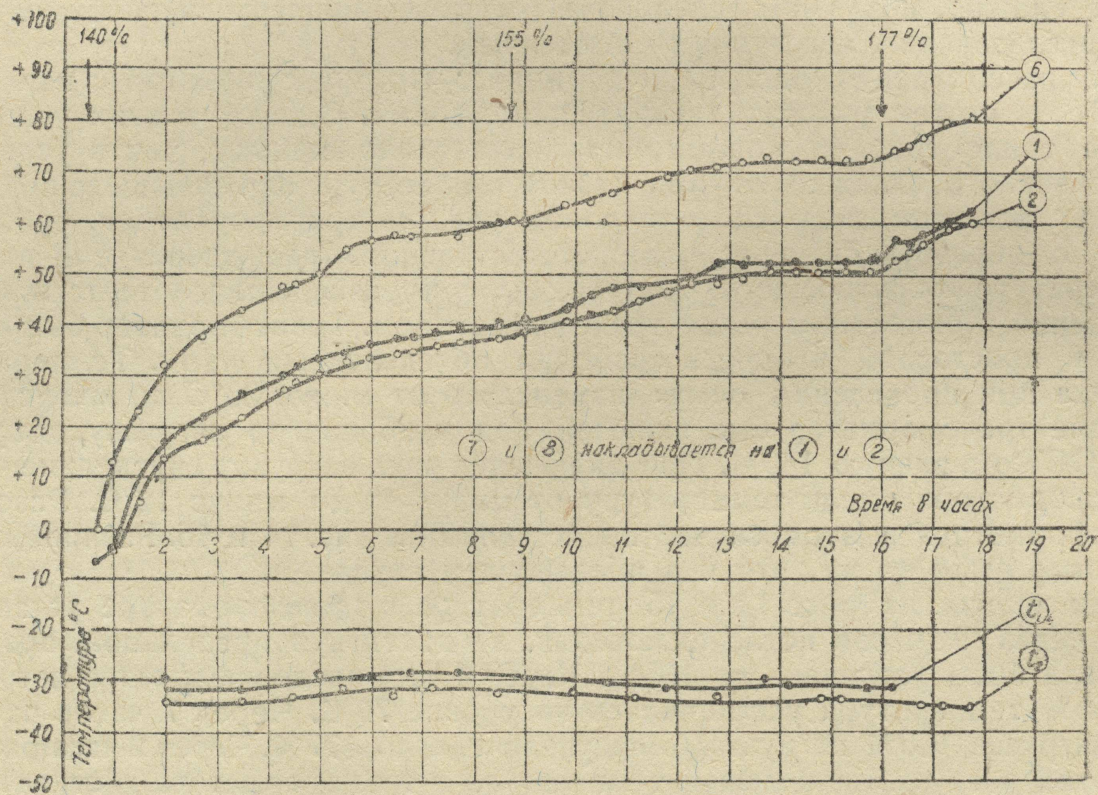
Для решения вопроса о тепловом режиме трансформатора, работающего с перегрузкой в условиях естественного охлаждения при низкой температуре окружающего воздуха, были произведены соответствующие измерения с описанным выше трансформатором. Трансформатор был помещен в просторной кабине и свободно обтекался воздухом. Температура воздуха при проведении опыта изменялась от минус 35°C до минус 38°C. Вначале трансформатор был включен под наибольшую нагрузку, допустимую ОСТ'ом, равную 140%. При включении под нагрузку внутренние части трансформатора имели температуру от минус 4° до минус 12°C. Разогрев трансформатора в этом случае представлен на рис. 14 и 15. Расположение термпар было то же, что и в предыдущем случае.

Как видно из рис. 14 и 15, температура в трансформаторе установилась через 9 часов после включения, не достигнув предельной, поэтому нагрузка была увеличена до 155%. Через 4 часа после увеличения нагрузки до 155% температура установилась на уровне 70°C. Через 7 часов работы при нагрузке 155% нагрузка была увеличена до 177%. Через 2 часа работы при этой нагрузке наивысшая температура в трансформаторе достигла значения 105°C, после чего нагрузка была снята.

Описанный опыт показывает, что при низкой температуре окружающего воздуха возможна длительная значительная перегрузка трансформатора, в частности при температуре окружающего воздуха, равной минус 35°C, для ТМ 100/6 возможна длительная работа не только при перегрузке на 40%, как это допускает ОСТ 2524, но и при перегрузке 150—155% от номинала. Температура обмотки при нагрузке 155% была равна 70°C, при учете поправки П. М. Тихомирова наивысшую температуру в этом случае можно считать равной 95°C. Согласно расчетам П. М. Шницера²⁷⁾, при такой температуре трансформатор может работать 16 лет, т. е. нормальный срок. Эти результаты позволяют поставить вопрос о длительной работе трансформаторов в зимние месяцы со значительной нормальной перегрузкой.

На возможность повышения используемой мощности трансформаторов за счет усиленного теплоотвода от кожуха указано также в статьях инж. В. В. Рубцова и инж. П. Д. Айзенберг²⁷⁾. Они получили увеличение нагрузки трансформатора сверх номинальной мощности на 20—40% за счет усиленного теплоотвода при поливании его кожуха водой. Однако, инж. П. А. Айзенберг обращает внимание на значительное увеличение

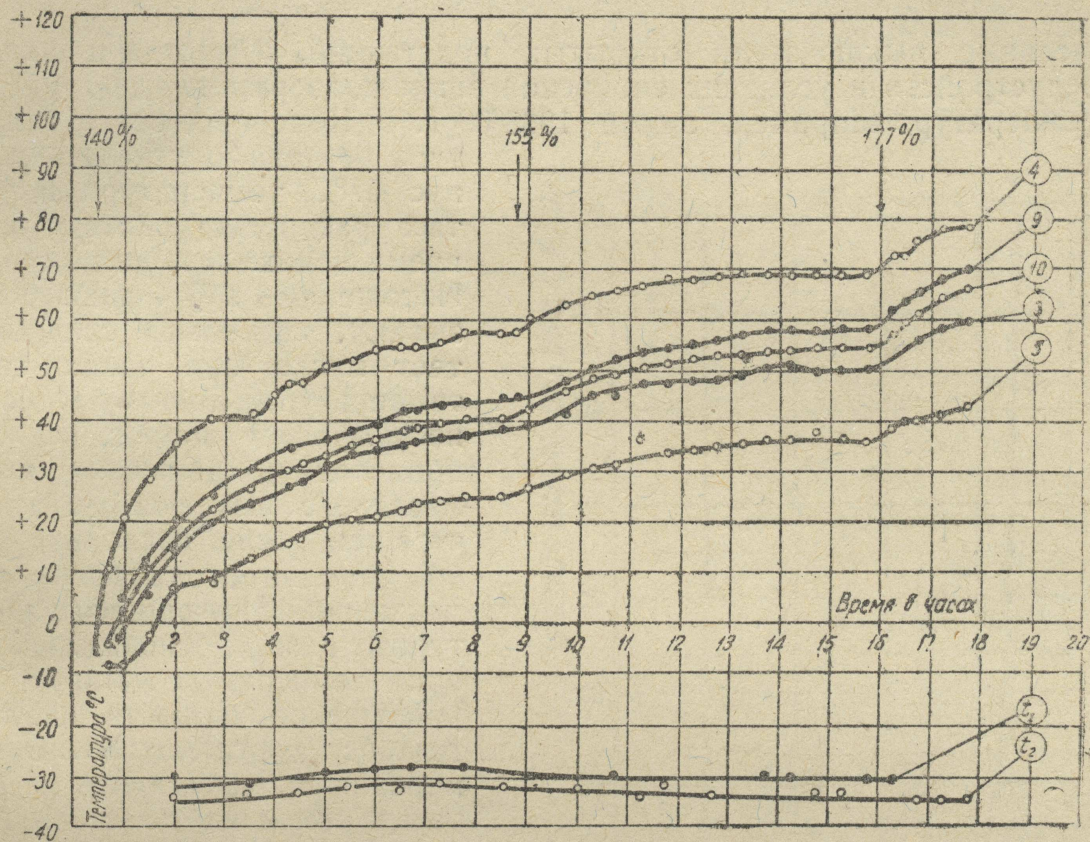
Тепловой режим перегруженного трансформатора,
работающего при температуре воздуха - 35° С



- ① - ребро трансформатора
- ② - масло на высоте середины катушки на расстоянии 20 мм от ВВ обмотки
- ⑥ - верхняя часть сердечника
- ⑦ - масло на высоте середины катушки на расстоянии 10 мм от ВВ обмотки
- ⑧ - масло на высоте середины катушки на расстоянии 5 мм от ВВ обмотки
- ② - температура воздуха на высоте верхнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора
- ② - температура воздуха на высоте нижнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора
- ↓ - подача нагрузки

Рис. 14.

Тепловой режим перегруженного трансформатора
работающего при температуре воздуха -35°C .



- ③ - промежуток между ВВ и НВ обмотками.
- ④ - верхний виток НВ обмотки.
- ⑤ - нижний виток НВ обмотки.
- ⑨ - поверхность ВВ обмотки на высоте середины катушки.
- ⑩ - контрольный термометр в трансформаторе.
- ⑪ - температура воздуха на высоте верхнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора.
- ⑫ - температура воздуха на высоте нижнего края ребра на расстоянии 50 см от трансформатора.
- ↓ - подача нагрузки.

Рис. 15.

потерь в меди при перегрузке трансформатора, так как они пропорциональны второй степени нагрузки. Поэтому дополнительная трансформаторная мощность, получаемая при перегрузке, будет давать потери больше, чем в случае установления дополнительной трансформаторной мощности; учитывая эти обстоятельства, перегрузку трансформаторов при работе их на холоду нельзя рекомендовать без учета экономического фактора. При отсутствии необходимой установленной мощности трансформатора при температуре ниже минус 30° можно допускать длительную работу трансформаторов вышеисследованного типа с перегрузкой на 50%.

РАБОТА МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.

Масляные выключатели открытых подстанций, а иногда и закрытых распределительных устройств в условиях сибирской зимы подвергаются действию низких температур, например, зимой 1938/39 г. в Кемерово, когда температура

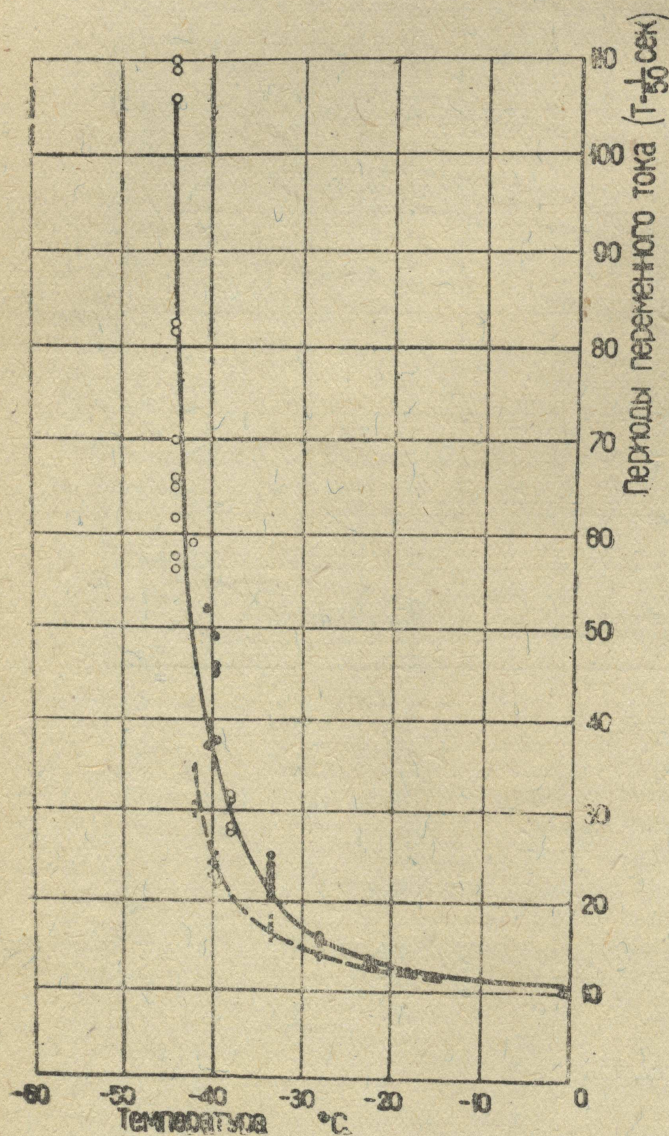


Рис. 16.

воздуха опускалась до минус 57°C , температура в закрытых распределительных устройствах в это время понижалась до минус 36°C . Изложенные в § 4 данные показывают, насколько сильно густеет масло при таких низких температурах, поэтому естественно возникает вопрос, как будет происходить движение штанги масляного выключателя в загустевшем масле, насколько сильно замедлится скорость этого движения. Имеющиеся литературные данные²⁸⁾ показывают, что при температуре минус 30°C уменьшение скорости движения траверсы достигает 25%. Эти измерения производились на аппаратах немецких подстанций, заполненных маслами со сравнительно хорошими низкотемпературными свойствами. Аналогичные данные получены по системе Мосэнерго²⁹⁾ до температур минус 20°C , но как указывают сами авторы, по этим данным трудно сделать определенные выводы о влиянии температуры на время движения штанги масляного выключателя.

А. К. Краси́н³⁰⁾ в нашей лаборатории произвел измерение времени движения штанги ВМ—14 при отключении в зависимости

от температуры до температур минус 44°C . Для опытов был использован ВМ—14 на 600 ампер с ГП—125. Аппарат был установлен на открытом воздухе. Привод к нему был установлен в помещении лаборатории.

Для определения времени движения штанги употреблялся шлейфовый осциллограф, причем положение штанги во время движения фиксирова-

лось в пяти различных точках с помощью контактной системы, укрепленной на валу привода.

Все измерения были проведены при холостой работе выключателя, при подаче на клеммы привода 110 вольт постоянного напряжения. Температура контролировалась по термометру, установленному вблизи выключателя.

На рис. 16 представлены данные одной из серий измерений. По оси абсцисс отложены значения температуры в °С, а по оси ординат—время полного движения штанги ВМ в периодах переменного тока. Светлые кружки соответствуют измерениям, сделанным при охлаждении выключателя, а темные—при нагревании.

Из рис. 16 видно, что до температур—30°С увеличение времени движения штанги не превосходит 50% от первоначального (при температуре 0°С). При температуре ниже минус 35—37°С начинается сильное увеличение времени движения штанги. При температуре минус 42°С был даже отмечен случай полной остановки движения штанги.

Подобные измерения времени движения были проведены трижды с двумя различными сортами масел. Результаты повторились.

Одновременно с измерением времени движения штанги производилось измерение вязкости масла, с помощью видоизмененного метода Стокса. На рис. 17 приводится полученная зависимость вязкости масла от температуры. Из рис. 16 и 17 видно, что температурный ход времени движения штанги совпадает с температурным ходом вязкости масла вплоть до температур минус 37°С. Ниже этой температуры начинается область нестабильной работы масляного выключателя. Оказалось, что в области нестабильной работы на движение штанги ВМ существенно влияет нагрузка от привода, после включения отключающей катушки и освобождения сердечника привода.

Полученные данные позволяют заключить, что в области стабильной работы ВМ время полного движения штанги определяется вязкостью масла и для исследованных масел может быть вычислено из следующего уравнения

$$\tau = 0,675 \varepsilon^{0,84 t} + 10, \quad (8)$$

где τ —время полного движения штанги в периодах переменного тока, t —температура масла в °С. Что касается области нестабильной работы ВМ, то какой-либо аналитической зависимости для времени τ в зависимости от температуры t не наблюдается.

Нам кажется, что полученные результаты, говорящие об однозначной связи между величинами τ и t , можно распространить на выключатели с большим объемом масла и для них из кривой температурного хода вяз-

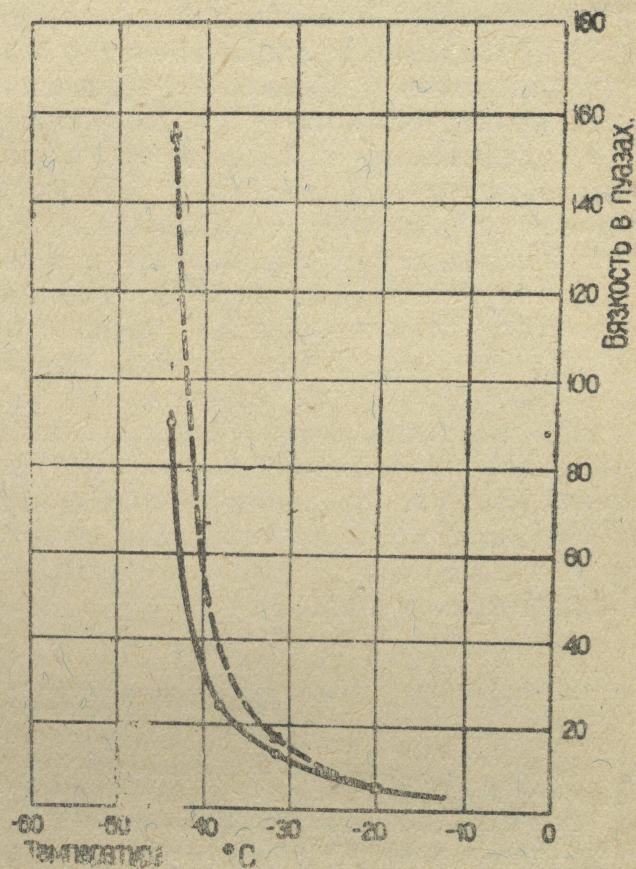


Рис. 17.

кости масла вычислять величину времени τ для различных температур вплоть до температуры, соответствующей крутому перегибу на кривой температурной зависимости вязкости.

В области резкого возрастания температурной зависимости вязкости масла масляник работать не может. Для нормальной работы ВМ в этой области температур необходим подогрев масла.

Проведенные измерения не претендуют на полноту в смысле описания работы ВМ в условиях низких температур. Наоборот, они подчеркивают необходимость скорейшего проведения исследовательских работ в этой области. В настоящее время необходимо выяснить следующие вопросы, связанные с работой ВМ при низких температурах:

1) измерение времени движения штанги в зависимости от температуры при пропускании тока через контакты ВМ;

2) получение зависимости скоростей и времен отключения и включения от температуры при различных напряжениях на клеммах привода;

3) проведение полного изучения приводов в условиях низких температур, определив минимальные включающие и отключающие напряжения для всего практически интересного диапазона температур;

4) исследовать поведение при низких температурах изоляции всех элементов схемы управления и самого ВМ, а также различного рода прокладок и уплотнений, употребленных в этих аппаратах;

5) исследование гашения дуги в застывшем масле;

6) полученная однозначная зависимость времени движения штанги ВМ от вязкости масла позволяет поставить вопрос о воспроизводстве условий работы ВМ в области низких температур при высоких температурах, если заполнять баки выключателя вязкими маслами.

Для масляных выключателей, назначаемых к работе в районах с низкой температурой, необходимо употреблять специальные холодоустойчивые масла. При употреблении обычных масел, зная температурную зависимость их вязкости, включать подогрев при температуре, соответствующей началу сильного возрастания вязкости. Соответствующие нормы подогрева должны быть уточнены.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Т. Бирюков. Электричество 14, 3, 1937. А. А. Воробьев и Н. А. Приходько. Журн. Техн. Физики 9, 1969, 1939 г.
2. Резолюции расширенного совещания по электроизоляционным материалам. Май 1940 г.
3. Труды конференции по борьбе с потерями энергии на ТЭЦ и аварийностью в сетях Кузбасса. Томск. 1940 г. ТИИ (в печати).
4. Штегер. Технология электроизолирующих материалов. ОНТИ. Энергоиздат. 1934 г.
5. А. А. Леонтьев. Успехи Физ. Наук. 23, в 2, 131, 1940.
6. В. Д. Кузнецов. Труды СФТИ. 4, 1, 1936 г.
7. Т. К. Томсен. Смазочное дело. Москва. 1932 г. Иванов и Гутцайт. Отчет о работе ВТИ. Громеницкий и Лучинский. Грозненское нефтяное хозяйство, 1922 г.
8. А. А. Воробьев и Н. А. Приходько. Электричество. 8, 66, 1940 г.
9. Иванов и Гутцайт. Loc. cit.
10. Ф. Ф. Волькенштейн. Пробой жидких диэлектриков. ОНТИ. ГТТИ 1934.
11. Инж. И. А. Глозман. Сборка маслонаполненных втулок 110 и 220 кв. ОНТИ, НКТП СССР. 1936, Р—19.
12. Е. Ф. Комарков. Электроматериаловедение. ОНТИ НКТ. СССР. 1935 г. Р. 78—96.
13. Ф. Ф. Волькенштейн. Loc. cit.
14. Н. А. Приходько. Отчет о работе. Томск. СФТИ. 1939 г. Он же. Отчет о работе. Томск. СФТИ. 1937 г.
15. М. Михайлов и Г. Соя. Журн. Техн. Физ. 6, 786, 1936.
16. В. А. Воробьев. Электричество 9, 53, 1940 г.
17. В. Ф. Божко. Труды СФТИ (в печати).
18. Н. Ф. Рыжкова. Отчет о работе. Томский индустр. ин-т. 1940 г. Электричество (в печати).
19. В. А. Баев. Изоляционные материалы. Госэнергоиздат. 1940. Р.—97.

20. А. А. Воробьев и А. Н. Снегирев. Изменение электрофизических свойств компаунда Э-3 в зависимости от температуры. СФТИ. Отчет о работе. 1940 г.
21. А. К. Красин и В. Ф. Божко. Отчет по испытанию заливного компаунда. СФТИ. 1937 г.
22. Резолюции расширенного совещания по электроизоляционным материалам 7—10 мая 1940 г. Москва. 1940. Р. 12. п. 11.
23. Е. К. Завадовская. Электричество. 8, 66, 1939 г.. Труды СФТИ (в печати).
24. Л. М. Шницер. Электричество. 1, 8, 1938; 12, 10, 1938; 12, 9, 1938.
25. Е. К. Завадовская, А. К. Красин и лаб. О. П. Нончуков. Отчет о работе тепловой режим трансформаторов, ч I, II и III. СФТИ. 1938—40 гг. А. К. Красин. Электричество. 7, 60, 1940 г. Труды СФТИ (в печати).
26. П. М. Тихомиров. Электричество 12, 24, 1938.
27. Инж. В. В. Рубцов. Вестн. Электром. 4, 29, 1939. Инж. В. А. Айзенберг. Вестн. Электром. 10—11, 43, 1939.
28. А. М. Залесский. Масляные выключатели. Кубуч. Ленинград, 1932.
29. В. П. Бурьянов. Электричество. 4, 21, 1937 г.
30. А. К. Красин. Электричество. 12, 52, 1939 г.

Редакционная коллегия: профессор М. К. Коровин (зам. отв. редактора), проф. И. Н. Бутаков, проф. Ф. Н. Шахов, проф. Г. Е. Баканов, проф. А. С. Бетехтин, проф. А. Н. Добровилов, доц. А. М. Розенберг, проф. А. А. Воробьев, проф. И. В. Геблер, доц. М. Э. Эфенди, доц. А. А. Белицкий.

Отв. редактор—проф. К. Н. Шмаргунов.

МН15271

Сдано в работу 29/XII-1940 г.

Подписано к печати 21/V-1941 г.

Цена 12 руб.

Тип. зн. в 1 печ. л. 62016

Объем 12 п. л., 18,6 авт. л.

Заказ № 2496-1940 г.

Тираж 500 экз.