

# ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для большинства кабельных изделий основным воздействием фактором в процессе эксплуатации, определяющим их работоспособность, является температура. Для силовых кабелей среднего и высокого напряжения, а также для других типов кабелей и проводов, подвергающихся воздействию повышенного напряжения, добавляется фактор электрического старения.

Основная масса кабельных изделий для телекоммуникаций, кабелей и проводов энергетического назначения эксплуатируется при температурах, не превышающих 100–120 °С в воздушной среде или при прокладке в земле. Обмоточные провода массового применения для обмоток асинхронных электродвигателей в пропитанном состоянии эксплуатируются при температурах 130–180 °С. Указанные воздействия можно считать нормальными условиями эксплуатации кабелей и проводов. Для таких условий эксплуатации в качестве электрической изоляции используются кабельная бумага, поливинилхлоридные пластикаты, полиолефины, радиационно- и химически сшиваемые материалы, эмалевые и пропиточные лаки.

К экстремальным условиям эксплуатации можно отнести воздействие температур 200 °С и выше при одновременном наложении других воздействующих факторов, которые могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики и работоспособность изделия.

К группе кабелей и проводов для экстремальных условий эксплуатации следует отнести и кабельные изделия, которые эксплуатируются в нормальных условиях, но к ним предъявляются требования по функционированию в случаях экстремальных, аварийных воздействий. Самым экстремальным из них является воздействие пламени в условиях пожара. После крупных аварий на атомных станциях в начале 80-х годов прошлого века, когда кабельные коммуникации явились источником распространения пожара, начались исследования и разработка кабельных изделий, к которым предъявляются специфические требования по пожаробезопасности.

К экстремальным воздействиям безусловно следует отнести и условия эксплуатации кабельных изделий в гермозоне атомных реакторов с учетом требований так называемых «малой и большой аварии». В этом случае кроме требований по пожаробезопасности накладываются требования по стойкости к повышенным уровням радиации, воздействию повышенных температур и давлений окружающей среды, влиянию дезактивирующих растворов и др.

За последние годы автором и коллективами ряда лабораторий ВНИИКП в содружестве с другими организациями выполнен большой объем работ по исследованию, разработке и массовому внедрению широкой номенклатуры кабелей и проводов пожаробезопасного исполнения для использования в атомных электростанциях, метрополитене, высотных зданиях, объектах с большим скоплением людей

и других важнейших объектах промышленности и оборонного комплекса. Сегодня это самостоятельное крупное направление науки и техники в кабельной промышленности.

Разработка кабелей и проводов для экстремальных условий эксплуатации имеет ряд особенностей. В первую очередь это касается выбора материалов изоляции и защитных покровов, а также подхода к конструированию этих элементов. Достаточно серьезные требования могут предъявляться к технологическим процессам и методам контроля качества.

Некоторые аспекты подхода к разработке кабельных изделий, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях, освещаются в настоящей работе на примере обмоточных проводов и питающего кабеля, применяемых в установках погружных электронасосов для добычи нефти.

В этих установках кабельные изделия подвергаются ряду экстремальных воздействий.

В настоящее время глубина скважин добычи нефти достигает 1,5–2 км и даже более, а откачиваемая жидкость может иметь температуру более 100 °С. В этом случае температура обмотки электродвигателя повышается до 200 °С и выше. Кроме того, обмоточные провода эксплуатируются в среде минерального или синтетического масла и водомасляной эмульсии. Особенностью погружных электродвигателей (ПЭД) является также то, что они имеют относительно малый диаметр и весьма большую длину, достигающую 8 м. Технологическую операцию обмотки таких двигателей осуществляют методом протяжки в закрытом пазе статора, а это накладывает особые требования к изоляции провода.

Электрическая изоляция обмоточного провода ПЭД кроме высокой нагревостойкости должна иметь высокую механическую и электрическую прочность при относительно низкой толщине изоляции (не более 0,23 мм), выдерживать условия технологической переработки в процессе намотки статора без снижения основных эксплуатационных характеристик.

Созданию обмоточных проводов для ПЭД и обеспечению их высокой надежности, а также технологии их производства посвящен целый ряд работ автора [1–10]. В данной работе приводятся некоторые результаты исследований, подтверждающих высокое качество созданных проводов, и результаты внедрения в производство.

До настоящего времени единственным материалом для изоляции обмоточных проводов, удовлетворяющих указанным выше экстремальным условиям эксплуатации, является полиимидная пленка, дублированная с двух или одной стороны фторопластом. При этом подслоем фторопласта необходим для обеспечения сваривания пленок между собой.

В [2, 5, 6] показано, что высокая механическая и электрическая прочность изоляции при ее малой толщине, хорошая адгезия к жиле реализуется только при спекании отдельных слоев пленки между собой и образовании монолитной

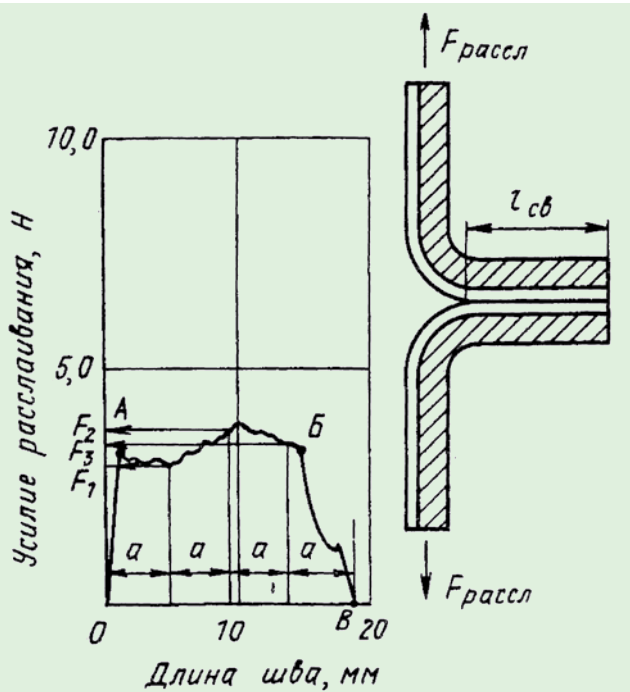


Рис. 1. Диаграмма расслаивания Т-образного сварного соединения полиимидно-фторопластовых пленок

и герметичной изоляции по всей длине провода. Поэтому выбор оптимальных режимов для сварки пленок в процессе изготовления проводов является важнейшей задачей.

Одним из основных параметров, определяющих качество сварного соединения, является температура нагрева полимера. Кроме температуры на качество сварного шва влияет давление и время сварки, которое зависит от скорости нагрева материала, скорости достижения полного контакта поверхностей при выбранных давлении и температуре, скорости перемешивания материалов за счет микрореологических процессов и скорости диффузии макромолекул по границам перемешанных микрообъемов материалов.

Для оценки качества сварки пленок применялся метод, основанный на расслаивании Т-образного соединения. Длина сварного шва  $l_{св}$  составляла 20 мм. На рис.1 представлена диаграмма, когда расслаивание происходит точно по шву. На диаграмме можно выделить три характерных участка: рост напряжений в сварном шве (О – А), расслаивание (А – В) и краевого эффект (В – В). Здесь  $F_{рассл}$  – сила расслаивания. Исследования, проводимые в окрестностях оптимальной точки факторного пространства переменных  $T = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 62 \text{ с}$ ,  $P = 0,31 \text{ МПа}$ , показали, что увеличение температуры или времени сварки сверх найденного предела не приводит к увеличению прочности сварного шва. Напротив, происходит снижение прочности, очевидно вследствие начала деструктивных процессов фторопластового покрытия. Увеличение давления сварки приводит вначале к росту прочности сварного соединения. В дальнейшем после достижения оптимального давления величина прочности практически не меняется.

При производстве проводов с пленочной изоляцией основным способом создания давления между отдельными слоями является обмотка токопроводящей жилы с заданным натяжением лент. При определении максимального натяжения ленты, которое можно создавать при обмотке, необходимо учитывать особенности процесса растяже-

ния полимерных пленок, в частности комбинированных полиимидно-фторопластовых пленок. В [7] показано, что пленки марки ПМФ-С не имеют явно выраженного предела вынужденной высокоэластичности, поэтому рекомендовано определять условный предел напряжения при вынужденной высокоэластичности  $\sigma_s$ , а исходя из этого максимально допустимую величину натяжения пленки любой ширины как

$$F_{\max} = K_s \cdot \sigma_s \cdot b \cdot \delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  и  $b$  – соответственно толщина и ширина пленки;  $K_s$  – коэффициент запаса, учитывающий разброс значений по длине, который для практических расчетов можно принять равным 0,8.

Минимальное усилие натяжения определяем по формуле

$$F_{\min} = P \cdot r \cdot b / \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где  $P$  – оптимальное давление при сварке лент;  $r$  – радиус поверхности сварного шва;  $\alpha$  – угол наложения ленты при обмотке.

Если по тем или иным причинам максимально возможное натяжение  $F_{\max}$  является меньше минимально допустимого  $F_{\min}$ , то сварка пленок происходит не при оптимальном давлении. Это встречается при обмотке прямоугольных проводов с большим отношением ширины провода к его высоте. В этом случае необходимо применять специальные меры, например добавочное обжатие изоляции профилированными валиками в процессе термообработки.

Исследованию с целью обеспечения температурно-временных условий сварки пленок в процессе изготовления обмоточных проводов посвящены работы автора [2, 4, 6, 9]. В настоящее время все современные машины для изготовления обмоточных проводов со спекаемой пленочной изоляцией совмещают процесс обмотки и термообработки. В таких машинах процессом, лимитирующим производительность при изготовлении проводов с большим сечением жил, является процесс термообработки. В [9] показано, что при использовании печи сопротивления со свободной конвекцией скорость нагрева проводов диаметром выше 2,0 мм значительно снижается, и процесс термообработки в этом случае становится лимитирующим фактором при производстве проводов, поскольку процесс высококачественной обмотки можно вести при скоростях 5–7 м/мин и даже выше. Приведенные расчеты показывают, что в этом случае только примерно 1/5 часть длины печи используется для нахождения провода в зоне оптимальных температур (320–350  $^\circ\text{C}$ ) для спекания изоляции. В связи с этим более надежным процессом термообработки с точки зрения качества спекания и эффективности использования печи сопротивления является комбинированный нагрев с применением индукционного высокочастотного нагрева в первой зоне. В этом случае провод в печь сопротивления поступает уже нагретым до температуры  $T_n$ . Если задаться определенной скоростью термообработки с обеспечением нагрева до конечной температуры  $T_m$ , то можно определить необходимую в этом случае начальную температуру провода  $T_n$  при входе в печь по формуле:

$$T_n = T_m e^{\mu t} - T_f (e^{\mu t} - 1), \quad (3)$$

где  $\mu = \frac{ap}{K_n C_m Q_m}$ ;  $a$  – коэффициент теплопередачи для провода;  $C_m$  – теплоемкость единицы объема металла;  $p$  – наружный периметр провода;  $Q_m$  – площадь сечения

по металлу;  $K_u$  – коэффициент увеличения теплоемкости провода за счет изоляции;  $T_r$  – температура термопары печи;  $t$  – время нагрева.

Рассчитанные по формуле (3) значения  $T_n$  при различных (приемлемых) скоростях термообработки  $V$  являются исходными данными для расчета необходимых параметров высокочастотного индуктора.

В [1, 3] для высокочастотного нагрева обмоточных проводов в поперечном магнитном поле предложен петлевой индуктор, показанный на рис. 2. На практике нашел применение также и цилиндрический (соленоидный) индуктор, нагрев провода в котором осуществляется при воздействии продольного магнитного поля. В [10] приведен расчет скорости нагрева проводов при использовании различных генераторов и индукторов, реально применяемых на практике, в зависимости от их параметров.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что наибольшую скорость нагревания обеспечивает петлевой индуктор с прямоугольными проводниками и соленоидный индуктор с внутренним размером 15 мм. Однако следует отметить, что изготовить соленоидный индуктор с такими внутренними размерами весьма трудно и на практике такие индуктора имеют диаметр не менее 20 мм. В целом приведенные в [10] расчетные данные позволяют обеспечить выбор индуктора и оптимизировать его размеры в зависимости от диаметра (размера) нагреваемого провода. При этом показано, что оптимизированный индуктор обеспечивает большую эффективность нагревания даже по сравнению с печами с циркуляцией воздуха уже при сечении провода свыше 4–5 мм<sup>2</sup>. С увеличением сечения эффективность нагревания провода увеличивается. Как известно, для обмоток погружных электродвигателей (ПЭД) используются провода в диапазоне диаметров от 2 до 4 мм.

Важно также подчеркнуть, что, как показывают расчеты, при обеспечении за счет индукционного нагрева значений  $T_n$  в диапазоне 190–240 °С для различных диаметров, время пребывания провода в печи при температурах 320–350 °С возрастает более чем в 3 раза, что повышает эффективность использования пространства печи и гарантирует

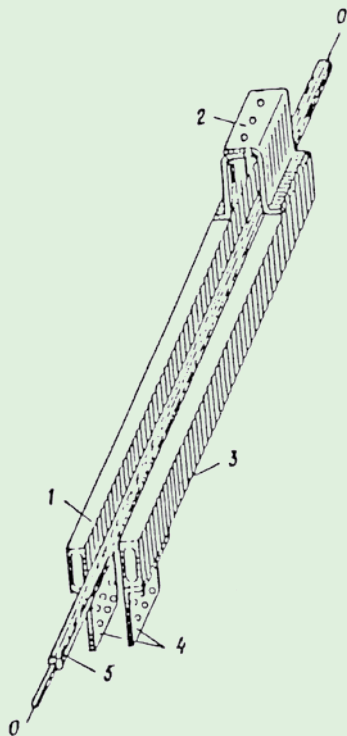


Рис. 2. Петлевой индуктор для высокочастотного индукционного нагрева кабелей и проводов

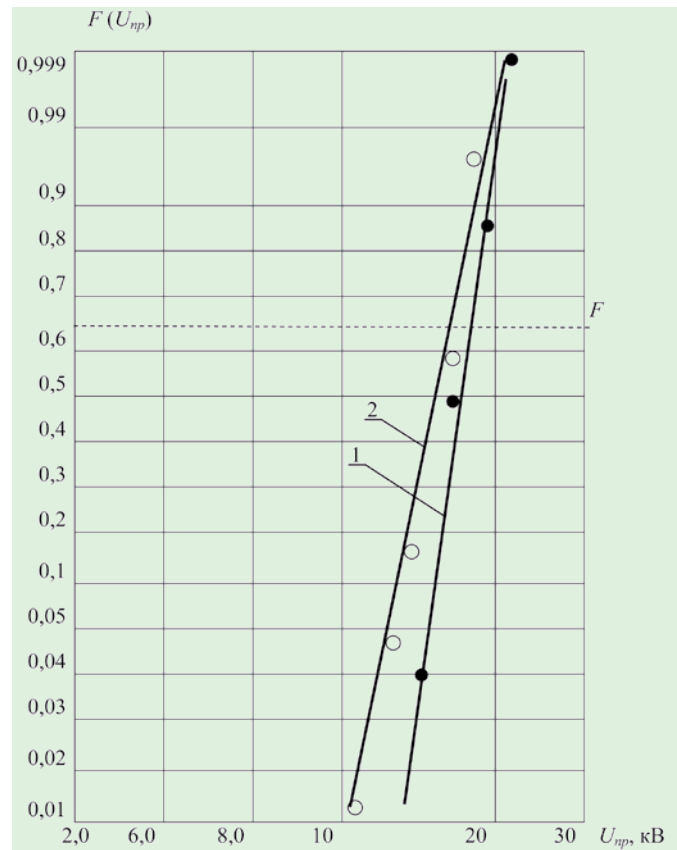


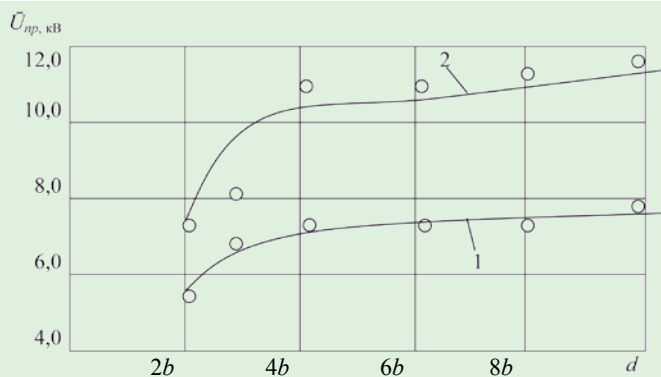
Рис. 3. Экспериментальные значения функции распределения пробивного напряжения обмоточных проводов марки ППИ-у 2,50 мм с изоляцией из пленок марки Каптон F (1) и марки ПМФ-с (2)

качество спекания изоляции при высоких скоростях ведения процесса термообработки. Расчеты проводились для печи длиной 4 м и  $T_r = 400$  °С.

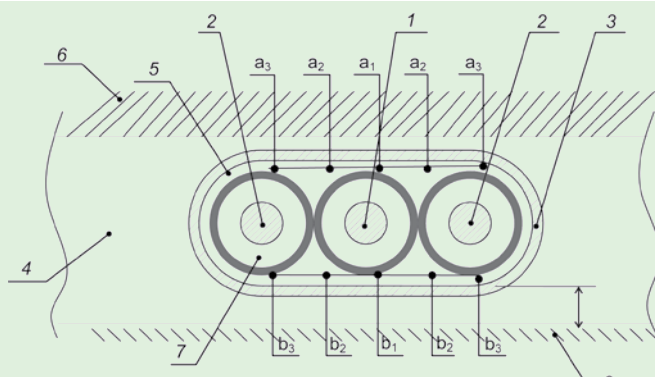
Следует отметить, что только многочисленные исследования процессов получения качественной изоляции и разработка промышленной оптимизированной технологии изготовления провода с использованием результатов исследований позволили гарантировать их работоспособность в экстремальных условиях эксплуатации. В качестве примера, подтверждающего высокое качество разработанных проводов, на рис. 3 представлены экспериментальные значения функции распределения Вейбулла пробивного напряжения проводов марки ППИ-у диаметром 2,5 мм. Малый наклон прямых распределения характеризует малый разброс значений и стабильность технологического процесса.

Качество спекания пленок и тем самым герметизацию изоляции, а также адгезию изоляции к жиле лучше всего характеризует стойкость проводов к изгибам. На рис. 4 показана зависимость электрической прочности изоляции прямоугольных проводов от радиуса изгиба при изгибе на ребро по малой стороне  $b$  (наиболее тяжелые условия).

Не менее экстремальным воздействиям в процессе эксплуатации подвергается кабель питания ПЭД у основания скважины (зона размещения электродвигателя и насоса). Это связано не только с высокой температурой откачиваемой жидкости, но и с другими условиями теплообмена, а также с тем, что кабель в этой зоне должен иметь минимально возможные габариты. В связи с этим как в отечественной, так и в зарубежной практике в настоящее время в кабельной линии погружного насоса широко применяется кабель-удлинитель длиной несколько десятков метров,



**Рис. 4.** Зависимость среднего значения пробивного напряжения от диаметра изгиба: 1 – провод марки ППИП-1 2,00 × 8,00 мм; 2 – провод марки ППИПК-3 2,00 × 8,00 мм



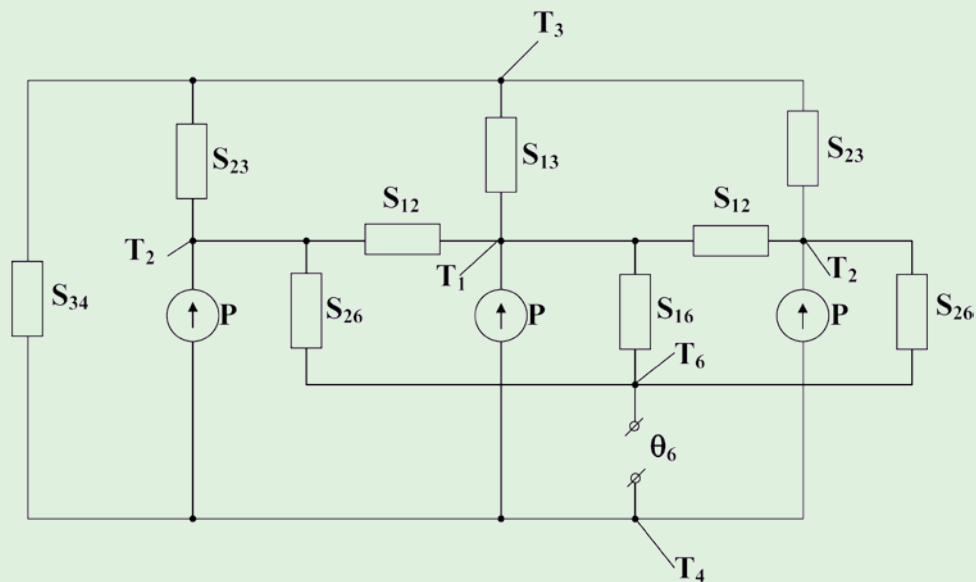
**Рис. 5.** Схема кабеля-удлинителя для теплового расчета: 1 – средняя жила; 2 – крайние жилы; 3 – броня; 4 – окружающая жидкость; 5 – подушка; 6 – корпус насоса; 7 – оболочка; 8 – насосно-компрессорная труба

соединенный с основным кабелем питания. Как правило, кабель-удлинитель, присоединяемый к электродвигателю, имеет меньшее сечение, чем основной кабель, может отличаться конструктивно, имеет более нагревостойкую изоляцию. Наиболее опасным местом для кабеля-удлинителя является зона его крепления к корпусу насоса по всей его длине. Условия теплообмена в этом месте отличаются от условий теплообмена кабеля в нефтяной скважине.

С целью выбора допустимого тока нагрузки и оценки максимально допустимого перегрева жилы, а соответственно и обоснования выбора изоляции соответствующей нагревостойкости в [11] представлен тепловой расчет кабеля-удлинителя в месте его крепления к насосу. Для проведения теплового расчета был выбран кабель марки КЭСБП-200 с изоляцией из этиленпропиленовой резины и свинцовой оболочкой по каждой жиле. Схема кабеля-удлинителя для теплового расчета представлена на рис. 5, а тепловая схема замещения на рис. 6. На основании указанной схемы замещения предложена методика расчета и разработана программа вычислений, которая позволяет производить анализ влияния воздействующих эксплуатационных факторов на допустимые параметры кабеля (нагрузка, температура на жиле) при различных параметрах окружающей жидкости, а также анализ влияния конструктивных размеров кабелей, характеристик изоляционных материалов и др. В качестве примера в [11] приведены результаты расчетов некоторых режимов эксплуатации кабеля-удлинителя сечением 16 мм<sup>2</sup>. Эти расчеты показали, что при температуре стенки насоса 150 °С, что часто встречается в практике эксплуатации (при аварийных режимах эта температура может быть значительно выше), в скважинах с температурой откачиваемой жидкости 100 °С и выше при номинальных токовых нагрузках температура на жиле кабеля превы-

шает 200 °С. В этом случае для изоляции жил необходимо применение особо нагревостойких материалов, аналогичных используемым в обмоточных проводах, описанных выше. В настоящее время в ряде конструкций кабелей-удлинителей предусмотрено применение полиимидно-фторопластовых пленок в качестве первого слоя изоляции, однако пока в отечественной практике они используются явно недостаточно, очевидно из-за высокой стоимости. В то же время приведенные в [11] данные показывают крайнюю необходимость такого технического решения для повышения надежности работы кабельной линии погружного насоса.

Сегодня провода с монолитной (спекаемой) изоляцией на основе полиимидно-фторопластовых пленок выпускаются целым рядом предприятий и находят применение не только для погружных электродвигателей насосов нефтедобычи, но и для тяговых электродвигателей электровозов, большегрузных автомашин, двигателей постоянного тока, работающих в тяжелых условиях. На рис. 7 показана современная линия ин-лайн для производства таких проводов круглого и прямоугольного сечения.



**Рис. 6.** Тепловая схема замещения кабеля-удлинителя: P – источники тепловых потоков в кабеле; T<sub>1</sub> – температура средней жилы; T<sub>2</sub> – температура крайних жил; T<sub>3</sub> – температура брони в области точек a<sub>3</sub> – b<sub>3</sub> – b<sub>1</sub> – b<sub>3</sub> – a<sub>3</sub> на длине (2d + πd)(соприкосновение с окружающей жидкостью); T<sub>4</sub> – температура окружающей жидкости; T<sub>5</sub> – температура оболочки; T<sub>6</sub> – температура корпуса насоса; S – тепловые сопротивления элементов кабеля; θ<sub>6</sub> = T<sub>6</sub> – T<sub>4</sub>





Рис. 7. Линия для производства проводов со спекаемой изоляцией на основе полиимидно-фторопластовых пленок

Рамки настоящей статьи не позволяют подробно остановиться на особенностях выбора материалов, конструирования и разработки технологии изготовления других видов кабельных изделий, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Автор надеется осветить эти вопросы в последующих публикациях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мещанов Г.И. О применении нагрева токами высокой частоты при изготовлении обмоточных проводов // Труды ВНИИКП. – М.: Энергия, 1967. – Вып. 17. – С. 90–105.
2. Мещанов Г.И. Выбор оптимальной конструкции и технологии запечки обмоточных проводов с пленочной изоляцией из фторопласта-4 // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1968. – Вып. 51. – С. 11–14.
3. Мещанов Г.И. Расчет КПД петлевого индуктора, применяемого для высокочастотного нагрева обмоточных проводов // Труды ВНИИКП. – 1976. – Вып. 19. – С. 142–152.
4. Крупенин Н.В., Мещанов Г.И. Технология термообработки обмоточных проводов с пленочной изоляцией нагревом токами высокой частоты // Электротехника. – 1983. – № 10. – С. 14–16.
5. Гнедин А.А., Мещанов Г.И. Новые конструкции обмоточных проводов с пленочной изоляцией для погружных электродвигателей насосов нефтедобычи // Электротехника. – 1986. – № 11. – С. 52–54.
6. Бугрова Л.Д., Гнедин А.А., Матвеева В.П., Мещанов Г.И., Сергеева Л.Н. Оптимизация технологии изготовления обмоточных проводов с монолитной изоляцией на основе полиимидно-фторопластовых пленок // Труды ВНИИКП. – 1988. – С. 82–94.
7. Гнедин А.А., Мещанов Г.И. Обмоточные провода с пленочной изоляцией. – М.: Информэлектро, 1987. – Вып. 2 (7). – 4,25 п.л.
8. Гнедин А.А., Месенжник Я.З., Мещанов Г.И., Прут Л.Я. Эксплуатационная надежность обмоточных проводов погружных маслозаполненных электродвигателей // Электротехника. – 1995. – № 5. – С. 46–48.
9. Мещанов Г.И. Термообработка проводов с пленочной изоляцией // Кабели и провода. – 2004. – № 5 (288). – С. 10–12.
10. Мещанов Г.И. Высокочастотный нагрев проводов при термообработке кабельных изделий // Электротехника. – 2009. – № 10.
11. Мещанов Г.И. Тепловой расчет кабеля-удлиниателя в нефтяной скважине // Электро. – 2010. – № 1. – С. 33–35.

## ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на II полугодие 2010 года (3 номера), в рублях с учетом НДС:

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1062 руб.,  
 для учебных заведений и студентов – 390 руб.,  
 для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1170 руб.,  
 для подписчиков других зарубежных стран – 33 у.е.

По вопросам подписки обращайтесь к Аппле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу:  
 ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;  
 КПП 772201001;  
 ОКОНХ 87100  
 р/с: 40702810238120102932  
 в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва  
 «Сбербанк России ОАО», г. Москва,  
 к/с: 30101810400000000225  
 БИК 044525225; ОКПО 18711078.

Подписной индекс  
 в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**