

Г. И. Мещанов, канд. техн. наук, генеральный директор;
С.Д. Холодный, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;
ОАО «ВНИИКП»

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ПРИ ИХ ГРУППОВОЙ ПРОКЛАДКЕ

Общие представления и конкретные данные о процессе горения полимеров приведены в [1, 2]. Характеристики процесса горения полимеров рассмотрены в [1–3].

Так, температуры воспламенения и самовоспламенения полиэтилена по [1] составляют соответственно $T_{вс} = 341$ и $T_{св} = 349$ °С, теплота сгорания и газификации 41–45 кДж/г и 2–2,3 кДж/г, а измеренная максимальная температура газов в пламени $T_{вм} = 1287$ °С. Температура пламени значительно снижается с понижением концентрации кислорода в воздухе C_k . Так, для полипропилена при $C_k = 0,19 - 0,21 T_{вм} \approx 1300$ °С, а при $C_k = 0,17 - 0,18 T_{вм} < 1100$ °С. Температура воспламенения возрастает с уменьшением концентрации кислорода в воздухе. Содержание антипиренов увеличивает температуру воспламенения и уменьшает теплоту сгорания.

Температура воспламенения ПВХ-пластиката зависит от летучести и давления паров пластификатора, а также от его содержания в компаунде.

Для начала развития процесса устойчивого горения необходимо значительное время (10–60 мин). За это время фронт зоны горения перемещается на расстояние 0,3–3 м. Скорость его движения v в среднем 0,3–3 мм/с. Время горения в зоне горения по [3] 100–200 с.

В настоящей работе предлагается методика расчета скорости распространения пламени при вертикальном и горизонтальном расположении кабелей на примере испытаний на нераспространение горения контрольных кабелей, а также теоретический анализ факторов, влияющих на эту скорость.

В кабелях контрольных, управления и других многожильных кабельных изделиях небольшого сечения объем металла значительно меньше объема изоляционных и защитных материалов. Так, в кабеле КПоВГнг 10 × 1 объем меди составляет около 15 % от общего объема. Для кабелей управления, сечения токопроводящих жил которых менее 1 мм², относительная величина объема металла еще меньше. В связи с этим, а также учитывая плотную укладку кабелей в пучках как при испытании в соответствии с [7], так и при прокладке в кабельных сооружениях, для приближенного расчета использована модель в виде сплошной пластины из полимерного материала. Размеры этой пластины, определенные, исходя из размеров пучка кабелей, установленных в [7], составляют 0,3 × 0,04 м.

Мощность теплового излучения $q_{инм}$, поступающего на поверхность полимера от горячих газов в пламени, рассчитана по методике [3]. Тепловой баланс [3] для поверхности полимера запишем в виде формулы

$$q_{инм} + q_k - q_n = 0, \quad (1)$$

где q_k – тепловой поток конвекции от горячего газа в пламени на поверхность полимера; q_n – тепловой поток излучения

от твердой поверхности полимера к стенкам камеры сгорания с температурой T_0 .

$$q_k = \alpha_k(T_{вм} - T_n), \quad (2)$$

$$q_n = \alpha_n(T_n - T_0), \quad (3)$$

где α_k и α_n – коэффициенты теплопередачи конвекцией и теплоизлучением, $\alpha_n = \varepsilon C_0 (T_n^4 - T_0^4)/(T_n - T_0)$, $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К; ε – коэффициент черноты поверхности полимера в инфракрасной области излучения (приблизительно 0,8); T_n – температура поверхности полимера.

Примем обозначения для разности температур $\theta = T - T_0$, тогда получим

$$q_{инм} = \theta_n (\alpha_k + \alpha_n) - \alpha_k \theta_{вм} \quad (4)$$

Величина $\alpha_k \sim 15$ Вт/м² · К рассчитана по известным формулам для коэффициента конвективной теплопередачи [5].

Результаты расчетов для $q_{инм}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Мощность теплового потока от излучения

$T_n, \text{ }^\circ\text{C}$	650	700	750	800
$q_{инм}, 10^4 \text{ Вт/м}^2$	2,35	3,33	4,17	5,29

По экспериментальным данным [3] температура поверхности T_n для различных режимов горения в середине зоны горения составляет 600–800 °С. Примем в среднем $T_n = 700$ °С.

Если из эксперимента известна глубина выгорания, например остаточная толщина полимерной оболочки кабеля как в [3], или глубина δ измерена после прекращения горения, известно время горения t_r и скорость движения фронта горения v , то можно определить линейную (по глубине от поверхности) скорость горения v_r и массовую скорость горения m'

$$v_r = \delta/t_r, \quad (5)$$

$$m' = \rho_n v_r, \quad (6)$$

где ρ_n – плотность полимера.

По m' определим мощность теплового потока вещества сгорания

$$q_{сг} = Q_{сг} m' = Q_{сг} \rho_n \delta/t_r, \quad (7)$$

где $Q_{сг}$ – удельная теплота сгорания минус теплота газификации, Дж/кг.

Длина зоны горения

$$L = vt_r. \quad (8)$$

По экспериментальным данным [3] за время горения 200 с глубина слоя выгорания полиэтилена $\delta = 0,34$ см, а $m = 3150$ г/м². Скорость горения вдоль координаты y будет $v_r = dm/dt = 3150/200 = 15,8$ г/м²с. При $Q_{cr} = 40000$ Дж/г получим $q_{cr} = 15,8 \cdot 40000 = 63,2 \cdot 10^4$ Вт/м².

Однако следует ожидать, что массовая скорость сгорания увеличивается с повышением температуры поверхности полимера и соответственно возрастает q_{cr} .

Полная мощность излучения пламени будет в два раза больше, так как пламя излучает не только на поверхность кабеля, но и в окружающую среду.

В среднем коэффициент излучения $k_{инн} = 2q_{инн}/q_{cr} = 0,1-0,15$, что соответствует температуре поверхности полимера 700 °С. Эта температура в среднем соответствует экспериментальным данным, а $q_{инн} = 3,33 \cdot 10^4$ Вт/м². По данным [1], значение коэффициента излучения $k_{инн}$ для «светлого» пламени составляет 0,04, а для «копящего» 0,15.

Таким образом, из данных табл. 1 следует, что в отличие от теорий, предлагаемых в [1] для расчета процесса горения полимеров, основным фактором, влияющим на горение полимеров, является излучение пламени на поверхность полимера.

Упрощенная схема для расчета движения границы фронта пламени показана на рис. 1. Зона пламени L продвигается вдоль оси x по поверхности полимера при $y=0$ со скоростью v . В данной модели предполагаем, что мощность излучения от пламени $q_{инн}$ линейно снижается вдоль оси x и на расстоянии $x = x_1$, $q_{инн} = 0$. При $x = 0$, $q_{инн} = q_0$. Уравнение для $q_{инн}$

$$q_{инн} = q_0 (1 - x/x_1). \quad (9)$$

Примем приближенно для теплового потока на границе зоны пламени $q_0 = 0,5 q_{инн}$.

Изменение теплового потока от времени в области $0 < t < t_1$

$$q_{инн} = q_0 \frac{t}{t_1}. \quad (10)$$

Полное время нагревания при сдвиге границы пламени от $x = 0$ до $x = x_1$

$$t_1 = x_1/v. \quad (11)$$

Перед фронтом пламени температура поверхности кабелей невысокая и приближенно принимаем коэффициенты теплопередачи излучением $\alpha_{ин}$ и конвекцией $\alpha_{кон}$ постоянными.

Ось y направлена перпендикулярно поверхности полимера. На границе $y = 0$ для температуры поверхности

$$q_{инн} = -\lambda d\theta/dy + (\theta - \theta_{в2})\alpha_{кон} + \theta\alpha_{ин}, \quad (12)$$

$\theta = T - T_0$, $\theta_{в2} = T_{в20} - T_0$, λ – теплопроводность полимера, T_0 – температура окружающей среды, $T_{в20}$ – температура горячих газов непосредственно перед фронтом пламени ($x = 0$).

Первое слагаемое в правой части – отвод тепла вглубь полимера, второе – к воздуху с температурой $\theta_{в2} = T_{в20} - T_0$ вблизи $x = 0$, третье – отвод тепла излучением к стенкам камеры сгорания.

Представим уравнение (12) в области изображений для преобразования Карсона с параметром p с учетом (10)

$$q_0/(pt_1) + \theta_{в2}\alpha_{кон} = -\lambda d\theta'/dy + \theta'(\alpha_{кон} + \alpha_{ин}). \quad (13)$$

Известно решение уравнения теплопроводности [6]

$$\theta' = A \exp(-y\sqrt{p/a}). \quad (14)$$

Из граничного условия (13) при $y = 0$ определим коэффициент A

$$A = (q_0 / pt_1 + \theta_{в2}\alpha_{кон}) / (\lambda\sqrt{p/a} + \alpha_{кон} + \alpha_{ин}). \quad (15)$$

Представим в области изображений при $y = 0$ $\theta' = \theta'_1 + \theta'_2$

$$\theta'_1 = (q_0\sqrt{a}/(t_1\lambda)) / (p(\sqrt{p} + \beta)), \quad (16)$$

$$\theta'_2 = (\theta_{в20}\alpha_{кон}\sqrt{a/\lambda}) / (\sqrt{p} + \beta), \quad (17)$$

$$\beta = (\alpha_{кон} + \alpha_{ин})\sqrt{a/\lambda}. \quad (18)$$

Оригиналы (17) и (16) получим по формулам из [4]

$$\theta_2 = (\theta_{в20}\alpha_{кон}/(\alpha_{кон} + \alpha_{ин})) \cdot f(\beta\sqrt{t}), \quad (19)$$

$$\theta_1 = (q_0 / (\alpha_{кон} + \alpha_{ин})) \cdot (t/t_1) \cdot f_1(\beta), \quad (20)$$

$$f_2(\beta\sqrt{t}) = 1 - \exp(\beta^2 \cdot t) \cdot \operatorname{erfc}(\beta\sqrt{t}), \quad (21)$$

$$f_1(\beta\sqrt{t}) = 1 - 2 / (\sqrt{\pi} \cdot \beta\sqrt{t}) + f_2(\beta\sqrt{t}) / (\beta^2 t). \quad (22)$$

Таким образом, скорость движения пламени зависит от мощности потока излучения на границе пламени q_0 , расстояния x_1 , на которое распространяется действие излучения и начальной температуры полимера $T_{ин}$.

Газификация ПЭ происходит при его термическом разложении. При газификации ПВХ-пластиката сначала происходит удаление пластификатора при температуре, близкой к температуре его кипения, и далее при более высокой температуре – деструкция ПВХ-полимера. Эти процессы недостаточно изучены, поэтому величины q_{cr} и $q_{инн}$ можно оценить только приближенно на основе экспериментальных данных по горению кабелей с учетом температуры поверхности кабелей (полимера) в зоне горения.

Дальность действия излучения x_1 зависит от конкретных условий горения (числа кабелей, их расположения). Можно предположить, что величина x_1 пропорциональна высоте пламени h . Высота пламени приблизительно равна расстоянию от поверхности полимера до точки в пламени, где заканчивается его светимость. Тогда значение x_1 можно найти по формуле

$$x_1 = k_1 h. \quad (24)$$

При горизонтальном расположении кабелей и отсутствии движения воздуха вдоль кабелей приблизительно $k_1 \sim 1$, а при вертикальном расположении кабелей или принудительном движении воздуха вдоль кабелей $1 < k_1 < 2$.

Скорость движения фронта горения по поверхности полимера зависит от начальной температуры полимера. Если существует движение горячих газов вдоль кабелей перед фронтом горения, возможны два варианта.

1. Горение горизонтально заполненной группы кабелей в тоннеле при скорости движения газов $v_{в}$. В этом случае на значительном расстоянии ℓ_1 кабели находятся в среде

Таблица 3

$v, \text{ мм/с}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\beta\sqrt{t_1}$	0,45	0,31	0,26	0,22	0,20	0,18	0,17	0,158	0,149	0,141
$\beta\sqrt{t_1}$	1,15	0,81	0,67	0,58	0,51	0,45	0,43	0,41	0,38	0,360
θ_1	335	252	220	196	171	157	149	142	134	128
θ_2	69	55	46	40	37	34	32	30	28	27
θ_n	110	80	65	60	55	50	47	46	45	43
T_m	435	407	333	316	283					

Температуру θ_n на границе фронта пламени рассчитываем при $t = t_m$.

Рассмотрим пучок из контрольных кабелей с размерами $0,3 \times 0,04$ м (по методике [7]). Коэффициенты теплопередачи рассчитаем по известным методикам [5]. Получим $\alpha_k = 4,1$, $\alpha_n = 8,5$.

Значения t_1 и t_m зависят от скорости движения границы пламени v по (11) и (26), при этом можно получить зависимость параметров, указанных в табл. 2, от скорости движения границы пламени. Значения этих параметров при различных значениях v приведены в табл. 3.

Температура воспламенения полиэтилена $T_{вс}$ равна значению $T_m = 341$ °С. Из табл. 3 следует, что этому значению соответствует скорость движения фронта пламени 0,58 мм/с.

При горизонтальном расположении кабелей и отсутствии принудительного движения воздуха вдоль кабелей данные табл. 3 необходимо скорректировать следующим образом. Начальная температура около фронта пламени приблизительно равна температуре окружающего воздуха, тогда $\theta_{в20} = 0$, $\theta_n = 0$ и значения θ_2 и θ_n в табл. 3 равны нулю; величина $k_1 = 1$ и $x_1 = 0,075$ м. В результате значение $\beta\sqrt{t_1} = 0,45$, которому соответствует $\theta_1 = 335$ °С и $T_m = 335 + 20 = 355$ °С будет приблизительно при скорости $v = 0,2$ мм/с.

При испытаниях по методике [7] нижняя часть вертикально расположенных кабелей подвергается действию пламени от горелки в течение 40 мин. Кабель считают устойчивым к горению, если горение прекращается на высоте менее 2,5 м. Примем в среднем эту высоту равной 1,5 м; тогда средняя скорость движения зоны пламени будет $v = \frac{1500}{40 \times 60} = 0,625$ мм/с.

В качестве примера приведем универсальную эмпирическую зависимость для v (мм/с) [1]:

$$lgv = lg(0,14 + 1,8 \cdot 10^{-8} Q_{ст} a) + (1,35 + 0,88 \cdot 10^{-4} Q_{ст}) / gC_k \quad (35)$$

где $Q_{ст}$ – теплота сгорания, кал/г; a – коэффициент температуропроводности, см²/с.

По этой формуле для ПЭ при $Q_{ст} = 10\,000$ кал/г, $a = 1,5 \cdot 10^{-3}$ см²/с и $C_k = 0,21$ получим $v = 0,26$ мм/с.

Эти данные более чем в 2 раза отличаются от полученных в табл. 3 (0,58 мм/с) и от экспериментальных данных при испытаниях по методике [7] (0,625 мм/сек), что свидетельствует о слишком грубом приближении эмпирической зависимости (35).

В зоне горения происходит постепенное прогревание все более глубоких слоев полимера. При температуре выше температуры воспламенения термопластичный ПЭ находится в расплавленном состоянии и следует считаться с возможностью деформации и даже стекания полимера. Сшитый ПЭ при температуре выше температуры воспламенения не плавится, а подвергается термодеструкции также с возможным появлением жидкой фазы.

При термодеструкции полимера происходит его газификация с образованием горючих газов. Неполное сгорание этих газов приводит к появлению коптящего пламени, у которого увеличивается мощность излучения $q_{нпм}$.

Газификация ПВХ-пластиката начинается с интенсивного удаления пластификатора при температуре вблизи его точки кипения (приблизительно 300 °С и более). По мере прогрева более глубоких слоев полимера происходит диффузия пластификатора по направлению к поверхности полимера. Температура воспламенения на начальной стадии горения определяется температурой воспламенения пластификатора. После удаления пластификатора при температуре воспламенения 391 °С и более происходит горение основного полимера ПВХ. Далее образуется промежуточный полимер с высоким содержанием углерода и возможно горение твердой поверхности полимера. Закономерности горения ПВХ-пластиката требуют отдельных исследований.

Общая мощность теплового потока сгорания нескольких кабелей, Вт/м

$$q_{стс} = \Pi \cdot q_{ст} \quad (36)$$

где Π – периметр по сечению в зоне горения.

Например, для одиночного кабеля $\Pi = \pi d$, а для пучка кабелей по методике [7] при одностороннем горении $\Pi = b$, где b – ширина пакета (0,3 м).

При испытании по методике [7] происходит поджигание кабелей с помощью горелки в течение 40 мин. В зоне действия пламени горелки и выше границы пламени горелки происходит значительное увеличение потока теплоты излучения от пламени на поверхность полимера $q_{нпм}$ (табл. 1). Это приводит к повышенной скорости горения и увеличенной длине зоны горения L в области действия горелки. По мере удаления зоны горения от горелки значения $q_{нпм}$ уменьшаются и будут соответствовать приведенным в табл. 1. Уменьшение $q_{нпм}$ приводит к снижению скорости движения зоны горения v и длины зоны горения L . Тогда температура горячих газов $\theta_{в2}$ уменьшается, что приводит к дальнейшему снижению v и L . Этот процесс в конечном итоге приводит к прекращению горения. Введение антипиренов и наполнителей в полимер уменьшает удельную теплоту сгорания и увеличивает температуру воспламенения. При этом уменьшается высота x , на которой затухает горение.

Для более точных расчетов и анализа закономерностей горения кабелей в различных условиях необходимо накопление экспериментальных данных. Особенно необходимо измерение температуры поверхности кабелей T_n при различной геометрии расположения кабелей и скорости продвижения фронта горения. Необходимо измерение температуры воздуха $T_{в20}$ перед фронтом горения, температуры поверхности непосредственно перед фронтом

горения, высоты пламени h , длины зоны горения L , глубины области выгорания δ .

При измерении температуры поверхности необходима правильная установка датчиков температуры при их минимальных размерах, позволяющих измерять температуру до 1000 °С.

В результате проведенных исследований предложена методика расчета скорости распространения пламени вдоль поверхности полимера при горизонтальном и вертикальном расположении кабелей, которая позволяет приближенно оценить влияние различных факторов на процесс горения кабелей в условиях пожара. Показано, что основным фактором при движении зоны горения вдоль поверхности полимера является излучение горячих газов от области пламени с максимальной температурой.

Литература

1. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981.
2. Кодолов В.Н. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1976.
3. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Физико-математическая модель процесса горения электрических кабелей при групповой прокладке // Кабели и провода. – 2007. – № 4.
4. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965.
5. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. / Под ред. Пешкова И.Б. Учебник. – М.: Академия, 2006.
6. Бронштейн И.Н. и Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Физматгиз, 1962.
7. ГОСТ Р МЭК 60332-3-22-2005. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей. Категория А.

ЮБИЛЕИ



БЕРСОНУ 80 лет

Виктору Семеновичу

13 января 2011 г. исполнилось 80 лет одному из старейших работающих специалистов-кабельщиков – Виктору Семеновичу Берсону.

Виктор Семенович Берсон родился в г. Москве. В 1954 г. он окончил Московский энергетический институт по специальности «электроизоляционная и кабельная техника». После окончания института был направлен на завод «Подольсккабель», где принял непосредственное участие в создании производства уникальных микропроводов из меди, сплавов сопротивления и драгоценных металлов, необходимых для нужд оборонной техники.

Затем В.С. Берсон работал на организованном в 1956 г. заводе «Микропровод». На этом заводе он прошел трудовой путь от мастера, инженера-конструктора до главного технолога и заместителя главного инженера по оборонной технике. Им были разработаны и внедрены провода особой стабильности для нужд ракетно-космической техники.

В.С. Берсон вместе со специалистами предприятий, возглавляемых легендарными конструкторами-оружейниками академиком РАН А.Г. Шипуновым и Героем социалистического труда Н.Ф. Макаровым, принял личное участие в разработке ПТУРСов, получив совместно с ними ряд авторских свидетельств и лицензий на изделия, проданные в страны дальнего зарубежья.

С 1973 г. по настоящее время работает в «Специальном проектно-конструкторском бюро», где в течение 21 года был директором и главным конструктором, затем главным конструктором проекта, а ныне работает главным специалистом-кабельщиком.

С 2001 по 2010 г. – председатель Совета директоров ЗАО «СПКБ Техно».

Под его руководством и при личном участии создан ряд установок для наложения гальванических покрытий на проводники, десятки эмальагрегатов, пилотные отечественные линии вытяжки оптического волокна, двадцать три вида испытательного оборудования и многие виды микрокабелей для специальных целей.

Кандидат технических наук Виктор Семенович Берсон является автором многих научных публикаций и тридцати шести авторских свидетельств на внедренные изобретения.

В.С. Берсон награжден орденами Трудового Красного знамени, «Знак Почета». В 1997 г. ему присвоено звание «Заслуженный машиностроитель Российской Федерации», в 2003 г. – звание «Почетный гражданин города Подольска».

Ассоциация «Электрокабель», ВНИИ кабельной промышленности и редакция журнала «Кабели и провода» поздравляют Виктора Семеновича с 80-летием! Желают ему здоровья, счастья, успешного продолжения работы, которая является частью его жизни!