

## Проблемы выбора внешней изоляции для работы в условиях загрязнения

КОРЯВИН А.Р.

*Приведены экспериментальные данные по электрической прочности загрязненных опорных изоляторов. Показано, что для обоснованного выбора габаритов изоляции, предназначенной для работы в условиях загрязнения, следует, в первую очередь, ориентироваться не на нормируемую ныне длину пути утечки, а на диапазоны изменения отношения длины пути утечки к высоте изоляции  $\Delta L_y/H$ , в рамках которых обеспечивается требуемая электрическая прочность изоляторов. Для изоляторов различного класса напряжения и нормированных степеней загрязнения выполнена оценка необходимых диапазонов  $\Delta L_y/H$ . Показано, что нижние и верхние границы аналогичных диапазонов  $\Delta L_y/H$ , нормируемых публикациями IEC/TS 60815, сильно завышены. Ориентация на рекомендованные этими документами границы  $L_y/H$  может приводить к выбору высоты изоляции с недопустимо низкой ее электрической прочностью по сравнению с требуемой. Сделан вывод о целесообразности пересмотра устаревшего ГОСТ 9920, нормирующего длину пути утечки, и модернизации публикаций IEC/TS 60815.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** опорные изоляторы, электрическая прочность, загрязнение, путь утечки, стандарты

Вопросы изучения электрической прочности внешней изоляции в условиях загрязнения и увлажнения при воздействии напряжения промышленной частоты на протяжении многих десятков лет находятся в центре внимания отечественных и зарубежных специалистов. Именно этот режим работы изоляции во многих случаях диктует минимально допустимые габариты изоляционных конструкций высокого напряжения и определяет степень надежности ее работы в эксплуатации. Вследствие множества факторов, влияющих на электрическую прочность загрязненной изоляции (особенности геометрии профиля ребра, его вылет, соотношение между вылетом ребра и межреберным расстоянием, угол наклона ребра, удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения и т.д.), отсутствия ясного понимания механизма разрядного процесса вдоль увлажненной поверхности слоя загрязнения до сих пор нет детально разработанной и общепризнанной физико-математической модели этого разрядного явления.

В очень упрощенном виде процесс перекрытия загрязненной изоляции можно представить следующим образом. При воздействии высокого напряжения на загрязненную и увлажненную изоляцию по слою загрязнения протекают активные токи утечки  $I_y$ , термическое действие которых при определенных условиях приводит к подсушке локальных кольцевых поясов (в первую очередь, на теле изолятора, где обеспечивается наибольшая плотность тока утечки). Образование подсушенных

кольцевых зон способствует появлению неравномерного распределения напряжения вдоль пути утечки с повышенной разностью потенциалов на этих поясах  $\Delta U_{с.п}$ . Рост  $\Delta U_{с.п}$  ограничивается значением разрядного напряжения промежутка, равного ширине сухого пояса  $U_{р.с.п}$ . При  $\Delta U_{с.п} = U_{р.с.п}$  происходит искровое перекрытие сухого пояса, переходящее в частичные дуговые разряды (ЧДР), которые непрерывно перемещаясь вдоль подсушенных поясов, представляют собой неустойчивую форму разрядного процесса.

В общем случае режим перемежающихся ЧДР не является недопустимым в эксплуатации, поскольку не приводит к потере электрической прочности изоляции. При определенных условиях режим ЧДР может быстро переходить в полное перекрытие изоляции, что приводит к нарушению ее электрической прочности. Считается, что необходимым и достаточным условием для успешного развития разряда вдоль загрязненной и увлажненной поверхности изолятора является выполнение неравенства [1]:

$$r_d \leq r_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $r_d$  — сопротивление единицы длины дуги;  $r_{\Pi}$  — сопротивление увлажненного слоя загрязнения на единицу длины пути утечки.

При выполнении (1) опорные точки дуги проскальзывают по увлажненному слою загрязнения без его подсушки со скоростью в 10 м/с и более.

В первом приближении можно считать, что в момент полного перекрытия изоляции падение напряжения на канале дуги длиной  $l_d$  ( $\Delta U_{l_d}$ ) практически совпадает с разрядным напряжением  $U_p \approx \Delta U_{l_d}$ . Отсюда следует, что увеличение длины дуги  $l_d$  способствует росту разрядного напряжения изоляции. Исходя из этих соображений изоляторы стали оснащаться ребрами, увеличивая тем самым длину пути утечки  $L_y$ , под которой понимается наименьшее расстояние по поверхности внешней изоляции между металлическими частями разного потенциала. Предполагалось, что если канал разряда будет использована вся длина пути утечки ( $l_d = L_y$ ), то рост  $L_y$  будет способствовать увеличению электрической прочности изоляции. В результате много лет назад был разработан ГОСТ 9920 [2], в котором для четырех степеней загрязнения, определенных в [3], нормируется соответствующая им удельная длина пути утечки  $\lambda$  (см. табл. 1).

Таблица 1

Степень загрязнения	Удельная поверхностная проводимость, мксм	Удельная длина пути утечки $\lambda$ , см/кВ
Легкая I	$5 \pm 0,5$	1,6
Средняя II	$10 \pm 1,0$	2,0
Сильная III	$20 \pm 2,0$	2,5
Очень сильная IV	$30 \pm 3,0$	3,1

В [3] для четырех степеней загрязнения нормируются удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения  $\chi$  и испытательные (выдерживаемые) напряжения  $U_{и}$ .

На практике удобнее пользоваться значениями 50%-х разрядных напряжений  $U_{50}$ . Связь между  $U_{50}$  и  $U_{и}$  задается выражением

$$U_{\text{выд}} = U_{и} = U_{50}(1 - 3\sigma), \quad (2)$$

где  $U_{\text{выд}}$  – значение выдерживаемого напряжения с вероятностью выдерживания  $Q_{\text{выд}} = 0,999$ ;  $\sigma$  – расчетный стандарт отклонения, равный 0,08.

Получаем  $U_{50} = U_{и} / 0,76$ .

Следует отметить, что в эксплуатации на внешнюю изоляцию относительно земли воздействует фазное напряжение сети, в то время как приведенные в табл. 1 значения  $\lambda$  определены как отношение длины пути утечки к наибольшему рабочему линейному напряжению сети. Во вновь разработанных международных документах IEC/TS 60815 (части 1–3) [4–6] и русской их версии – ГОСТ Р 56736-2015 (части 1–3) [7–9] неудачное определение  $\lambda$  заменено на более корректное – как отношение длины пути утечки к наибольшему рабочему фазному напряжению сети.

В свое время введение нормированной удельной длины пути утечки  $\lambda$  и соответственно самой длины пути утечки  $L_y$  сыграло положительную роль, поскольку давало производителям продукции простые рекомендации по выбору изоляции для ее эксплуатации в районах с разными степенями загрязнения. Однако вскоре выяснилось, что длина пути утечки не может служить надежным критерием при выборе габаритов загрязненной изоляции. В условиях конкурентной борьбы у производителей продукции мог появиться соблазн снизить высоту изоляции  $H$ , ожидая, что неизбежное падение ее электрической прочности можно будет скомпенсировать за счет увеличения длины пути утечки. Вопреки ожиданиям, такой формальный подход привел к обратному результату: чрезмерное увеличение  $L_y$  сопровождалось не подъемом, а снижением электрической прочности изоляции. Выполненные экспериментальные исследования позволили выявить причину полученного эффекта, заключающаяся в особенностях формирования разрядного процесса в зависимости от длины пути утечки.

Было установлено, что при относительно небольших значениях  $L_y$ , не превышающих некоторое критическое значение ( $L_y \leq L_{y,кр}$ ), в завершающей стадии разрядного процесса дуговой канал распространяется вдоль всей длины пути утечки или по большей ее части (рис. 1,а). В области  $L_y > L_{y,кр}$  разрядом используется лишь относительно небольшая часть длины пути утечки, которая убывает с ростом  $L_y$  (рис. 1,б).

Для оценки степени эффективности использования разрядным каналом длины пути утечки было введено понятие «эффективная длина пути утечки»  $L_{y,эф}$  [10].

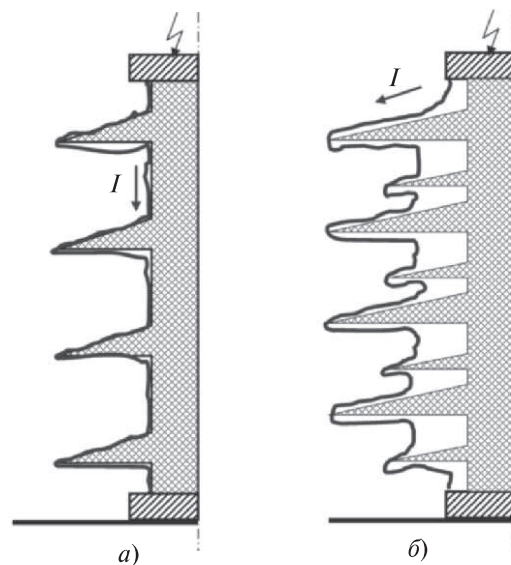


Рис. 1. Схематическое изображение эффективного (а –  $L_y < L_{y,кр}$ ) и неэффективного (б –  $L_y > L_{y,кр}$ ) использования каналом разряда длины пути утечки

Учитывая прямую связь между длиной канала дуги  $l_d$  и значением разрядного напряжения  $U_p$ , можно предположить, что лишь в области  $L_y \leq L_{y,кр}$  следует ожидать роста, а в области  $L_y > L_{y,кр}$  — снижения электрической прочности изоляции. Это предположение полностью подтвердилось результатами экспериментальных исследований электрической прочности загрязненных опорных изоляторов, выполненных в ВЭИ [11] и дополненных данными НИИПТ [12]. Прежде всего, было установлено, что, независимо от материала диэлектрика (фарфор или полимер), 50%-я разрядная напряженность вдоль пути утечки  $E_{50L}$  ( $E_{50L} = U_{50} / L_y$ ), в зависимости от удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения  $\chi$ , может быть представлена как

$$E_{50L} = A / \chi^\alpha, \quad (3)$$

где  $A$  — функция от отношения длины пути утечки к высоте изолятора по его изоляционной части  $L_y / H$ ;  $\alpha = 0,3$  для одиночных изоляторов.

Анализ опытных данных позволил выделить две группы изоляторов, отличающихся видом функции  $A = F(L_y / H)$ . В первую группу вошли изоляторы, для которых зависимость  $A = F(L_y / H)$  может быть аппроксимирована линейной функцией (рис. 2,а):

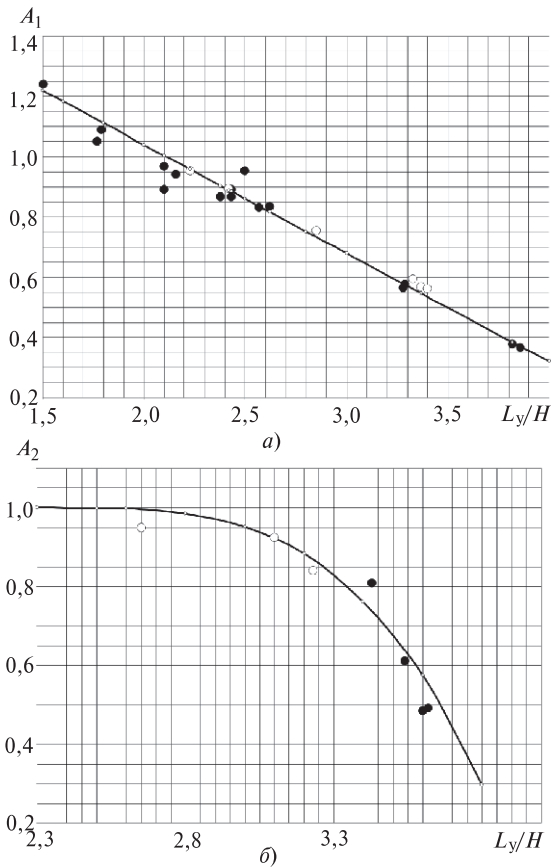


Рис. 2. Зависимости  $A = F(L_y / H)$  для изоляторов первой (а) и второй группы (б): ● — фарфоровые изоляторы; ○ — полимерные изоляторы; — — расчет

$$A_1 = 1,76 - 0,36(L_y / H). \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо при  $1,5 \leq (L_y / H) \leq 4,0$  и  $1 \leq \chi \leq 35$  мкСм.

Для второй группы изоляторов опытные данные могут быть описаны с помощью выражения (рис. 2,б):

$$A_2 = 1 - 0,17[(L_y / H) - 2,3]^{3,5}. \quad (5)$$

Выражение (5) справедливо при  $2,3 \leq (L_y / H) \leq 3,8$  и  $1 \leq \chi \leq 35$  мкСм.

Подставляя в (3) выражения (4) и (5), можно для каждой из двух групп изоляторов оценивать 50%-ю разрядную напряженность изоляции вдоль длины пути утечки  $E_{50L}$ .

С практической точки зрения наибольший интерес представляет 50%-я разрядная напряженность по высоте изоляционной части изолятора  $E_{50H}$ , поскольку, как показано в [13], при заданной удельной поверхностной проводимости  $\chi$  для колонок высотой от 1 до 13 м, составленных из однотипных изоляторов, значение  $E_{50H}$  остается неизменным. Знание  $E_{50H}$  дает возможность определять величину 50%-го разрядного напряжения изоляторов ВН и СВН.

Учитывая, что связь между  $E_{50L}$  и  $E_{50H}$  определяется как

$$E_{50H} = E_{50L}(L_y / H), \quad (6)$$

можно записать

$$E_{50H} = \frac{A(L_y / H)}{\chi^\alpha}. \quad (7)$$

На рис. 3 для двух групп изоляторов представлены опытные и рассчитанные по (7) с учетом (4) и (5) зависимости  $E_{50H} = F(L_y / H)$ .

Как и предполагалось, представленные на рис. 3 зависимости имеют  $\cap$ -образный характер с максимумом в области  $L_y / H \approx 2,5$  для первой группы изоляторов и  $L_y / H \approx 3,1$  — для второй группы. Указанные значения  $L_y / H$  можно принять в качестве оптимальных —  $(L_y / H)_{опт}$ . По мере увеличения удельной поверхностной проводимости  $\chi$  опытные и расчетные данные смещаются в область меньших значений  $E_{50H}$ .

Учитывая своеобразный вид зависимостей  $E_{50H} = F(L_y / H)$ , параметр  $A$  из формул (3)–(5) и (7) и снижающийся по мере роста  $L_y / H$  можно рассматривать в качестве коэффициента эффективности использования разрядом длины пути утечки ( $A = K_{эф}$ ). Действительно, в области  $L_y / H \leq (L_y / H)_{опт}$  по мере увеличения  $L_y / H$  наблюдается рост электрической прочности изоляторов, но

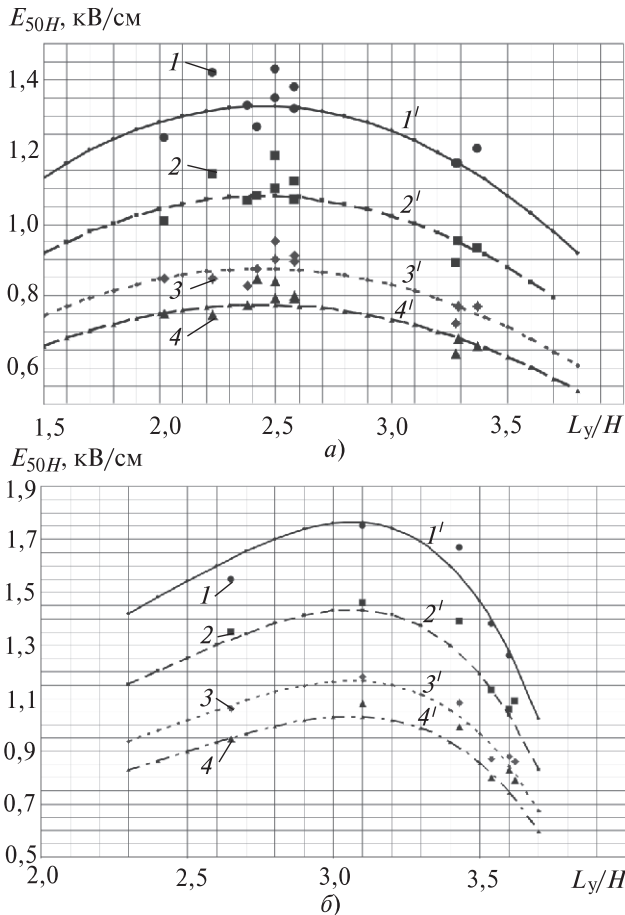


Рис. 3. Влияние отношения  $L_y / H$  на значение 50%-й разрядной напряженности по высоте изоляции  $E_{50H}$  для изоляторов первой (а) и второй (б) группы: опыт — 1 — 5 мкСм; 2 — 10 мкСм; 3 — 20 мкСм; 4 — 30 мкСм; расчет — 1' — 5 мкСм; 2' — 10 мкСм; 3' — 20 мкСм; 4' — 30 мкСм

не прямо пропорциональный. Это указывает на постепенное снижение отношения длины дугового канала  $l_d$  к длине пути утечки ( $l_d/L_y$ ), т. е. свидетельствует о постепенном снижении эффективности использования разрядом длины пути утечки. При  $L_y / H = (L_y / H)_{\text{опт}}$  достигается оптимальное отношение  $(l_d/L_y)_{\text{опт}}$ . Снижение электрической прочности изоляции в области  $L_y / H > (L_y / H)_{\text{опт}}$  можно объяснить дальнейшим снижением отношения  $l_d/L_y$  по сравнению с  $(l_d/L_y)_{\text{опт}}$ .

Из анализа представленного на рис. 3 материала следует:

1) отношение  $L_y / H$  может служить в качестве одного из важных параметров при выборе изоляторов;

2) в целом, при прочих равных условиях и обеспечении требования  $L_y / H = (L_y / H)_{\text{опт}}$  изоляторы второй группы имеют электрическую прочность примерно на 30% выше, чем для изоляторов первой группы;

3) если в качестве минимально допустимого принять значение  $E_{50H}$ , соответствующее нижней

границе  $L_y / H$  ( $L_y / H = 1,5$  — для изоляторов первой группы и  $L_y / H = 2,3$  — для изоляторов второй группы), то верхний допустимый предел  $L_y / H$  не должен превышать 3,4 — для изоляторов первой группы и 3,5 — для изоляторов второй;

4) если исходить из принципа оптимизации, то при выборе изоляторов следует ориентироваться на левые ветви  $\cap$ -образных зависимостей с верхним пределом  $L_y / H$ , равным  $(L_y / H)_{\text{опт}}$  или немного больше, поскольку при заметном превышении  $L_y / H$  над  $(L_y / H)_{\text{опт}}$  будут иметь место перерасход изоляционного материала и падение электрической прочности изоляции; помимо отношения  $L_y / H$  оптимизация должна включать в себя и другие важные параметры, такие как геометрия профиля ребра, его вылет, соотношение между вылетом ребра и межреберным расстоянием, между межреберным расстоянием и диаметром тела изолятора, угол наклона ребра и т.п.;

5) расчетные кривые рис. 3 могут быть использованы на практике в качестве нижней границы опытных данных.

Учитывая заметное различие в электрической прочности испытанных изоляторов двух групп, в практическом плане важно было установить для них идентификационные признаки, основанные на конструктивных особенностях изоляторов. Прежде всего, следует отметить, что изоляторы первой группы в большинстве случаев (при  $L_y / H < 3,0$ ) имели простой профиль ребра (постоянный вылет ребра  $a$ ), а при  $L_y / H > 3,0$  — переменный вылет ребра (вылет ребра большого —  $a_b$  и вылет ребра малого  $a_m$ ). Изоляторы второй группы при  $L_y / H > 3,0$  имели, как правило, переменный вылет ребра. Диаметр тела изоляторов первой группы  $d_T$  изменялся от 42 до 220 мм, а второй группы — от 50 до 140 мм. Такой важный конструктивный параметр как отношение межреберного расстояния к вылету ребра находился, как правило, в рекомендуемом диапазоне значений ( $b/a = 0,8 \div 1,2$ ).

Для идентификации двух групп изоляторов с переменным вылетом ребра были выбраны образцы с близкими значениями  $L_y / H$ . Данные по геометрическим параметрам и электрической прочности этих изоляторов при удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения 10 мкСм приведены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что для двух групп изоляторов с существенно разными значениями  $E_{50H}$  не было выявлено каких-либо характерных отличий в таких важных параметрах, как отношение расстояния между большими (малыми) ребрами и вылетом большого (малого) ребра. В то же время между диаметром тела изолято-

Таблица 2

Группа изоляторов	Параметр									
	$L_y/H$	$d_T$ , см	$a_6$ , см	$a_M$ , см	$b_6$ , см	$b_M$ , см	$b_6/a_6$	$b_M/a_M$	$b_6/d_T$	$E_{50H}$ , кВ/см
1-я	3,28	9,2	6,7	5,2	7,95	3,98	1,19	0,765	0,86	0,89
2-я	3,1	5,0	4,7	3,2	6,6	3,3	1,4	1,03	1,32	1,46
	3,43	7,5	6,3	4,8	7,65	3,83	1,21	0,8	1,02	1,39

ров и их электрической прочностью наблюдается явная взаимосвязь. Взаимосвязанными являются также отношение межреберного расстояния к диаметру тела ( $b_6/d_T$ ) и величина  $E_{50H}$ . Отмеченные взаимосвязи вполне закономерны, что подтверждается выражением [1]:

$$E_{50H} = \frac{L_y}{H} \frac{C^{\frac{1}{1+n}}}{(\chi\pi D_{\text{ЭКВ}})^{\frac{n}{1+n}}}, \quad (8)$$

где  $D_{\text{ЭКВ}}$  – диаметр гладкого цилиндра, площадь поверхности которого равна площади поверхности ребренного изолятора;  $n=0,56$ ;  $C=140$  ВА<sup>n</sup>/см.

Изоляторы с переменным вылетом ребра с относительно большими значениями  $L_y/H$  и малым диаметром тела не всегда удается выполнить. Ограничением для их изготовления могут быть требования по обеспечению высоких механических характеристик.

Учитывая важность параметра  $L_y/H$ , в публикациях [4–6] и русской их версии [7–9], помимо нормированных значений длины пути утечки, был введен рекомендуемый и допустимый диапазоны изменения  $L_y/H$ , которые для фарфоровых и стеклянных изоляторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Степень загрязнения	Диапазон изменения $L_y/H$		
	Рекомендуется	Допускается	Не допускается
I	2,5–3,625	3,625–4,4	> 4,40
II	2,5–3,75	3,75–4,55	> 4,55
III	2,5–3,875	3,875–4,7	> 4,70
IV	2,5–4,0	4,0–4,85	> 4,85

Примечание. Не допускается <2,5.

При анализе данных табл. 3 обращает на себя внимание ряд особенностей:

1) нижняя граница рекомендуемого диапазона  $L_y/H$  остается неизменной и составляет 2,5, независимо от класса напряжения изоляции и степени загрязнения;

2) верхние границы рекомендуемого и допустимого диапазонов  $L_y/H$  также не зависят от класса

напряжения изоляции и увеличиваются по мере роста степени загрязнения (для полимерных изоляторов максимально допустимые значения  $L_y/H$  оказываются еще выше);

3) верхние границы рекомендуемого и допустимого диапазонов  $L_y/H$  заметно превышают допустимые значения, определенные по рис. 3.

Следует также подчеркнуть, что введение в [4–6] диапазонов изменения  $L_y/H$  в сочетании с нормированными значениями  $L_y$ , полностью совпадающих с приведенными в [2], коренным образом меняет ситуацию при выборе изоляторов, поскольку позволяет однозначно определять их высоту по изоляционной части  $H$ .

Используя приведенные на рис. 3 зависимости  $E_{50H} = F(L_y/H)$ , построенные по выражению (7) с учетом (4) и (5) для двух групп изоляторов, и нормированные значения длины пути утечки  $L_{y, \text{норм}}$ , для разных классов напряжения изоляции и степеней загрязнения была выполнена оценка высоты изоляции  $H$  и рекомендуемый диапазон изменения  $L_y/H$ . Для сравнения выполнялась оценка высоты изоляции  $H$ , исходя из рекомендаций [4–6] по выбору диапазона изменения  $L_y/H$ .

Расчетные оценки проводились при условии выполнения двух основных требований:

в рамках каждого класса напряжения изоляции и данной степени загрязнения 50%-е разрядные напряжения изоляции  $U_{50}$  должны быть не ниже нормированных значений, определенных по (2);

высота изоляции  $H$  должна быть не ниже минимально допустимого значения  $H_{\text{мин.доп}}$ , найденного экспериментально-расчетным путем по нормированным [3] значениям испытательных напряжений при разных их формах (одноминутное напряжение промышленной частоты в сухом состоянии и под дождем, грозовой импульс 1,2/50 мкс, коммутационный импульс 250/2500 мкс). Результаты оценочных расчетов приведены в табл. 4.

Из анализа данных табл. 4 следует:

1. Высота загрязненной изоляции  $H$  должна быть не менее минимально допустимой  $H_{\text{мин.доп}}$ , значение которой зависит от класса напряжения изоляции и определяется формой и значением нормированного испытательного напряжения. В

Таблица 4

Степень загрязнения	Длина пути утечки $L_{у.норм.}$ , см	Высота изоляционной части $H$ , см	Диапазон изменения		Высота изоляционной части $H$ , см	Диапазон изменения		Высота изоляционной части $H$ , см	Диапазон изменения отношения $\Delta(L_y / H)$
			длины пути утечки $\Delta L_y$ , см	отношения $\Delta(L_y / H)$		длины пути утечки $\Delta L_y$ , см	отношения $\Delta(L_y / H)$		
			1-я группа			2-я группа		По ИЕС/TS 60815	
$U_{НОМ} = 6$ кВ; $U_{50} = 9,2$ кВ ( $H_{мин.доп.}=7,7$ см; $U_{и}=32$ кВ - 50Гц)									
I	13	7,65	13–24,5	1,7–3,2	5,65	–	–	5,2	2,5–4,4
II	17	9,1	17–27,3	1,87–3,0	7,39	–	–	6,8	2,5–4,55
III	21	11,05	21–32,9	1,9–3,0	9,13	22,6–31,5	2,48–3,45	8,4	2,4–4,7
IV	25	12,2	25–34,9	2,04–2,85	10,87	25,5–38,0	2,35–3,5	10	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 10$ кВ; $U_{50} = 13,2$ кВ ( $H_{мин.доп.}=10,1$ см; $U_{и}=42$ кВ - 50Гц)									
I	22	10,05	22–27	2,2–2,7	9,57	–	–	8,8	2,5–4,55
II	28	12,3	28–31,6	2,28–2,57	12,17	28–43	2,3–3,53	11,2	2,5–4,55
III	35	15,2	35–39,8	2,31–2,62	15,2	35–53,7	2,3–3,53	14	2,5–4,7
IV	42	17,1	42–44,5	2,46–2,6	17,0	42–60	2,47–3,53	16,8	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 15$ кВ; $U_{50} = 19,7$ кВ ( $H_{мин.доп.}=13,3$ см; $U_{и}=55$ кВ - 50Гц)									
I	32	15,1	32–41,8	2,12–2,77	13,9	32–48,9	2,3–3,52	12,8	2,5–4,4
II	41	18,5	41–50,1	2,22–2,71	17,83	41–62,9	2,3–3,53	16,4	2,5–4,55
III	51	22,7	51–60,6	2,25–2,67	22,2	51–78,4	2,3–3,53	20,4	2,5–4,7
IV	62	25,4	62–63,8	2,44–2,51	25,0	62–88,3	2,48–3,53	24,8	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 20$ кВ; $U_{50} = 26,3$ кВ ( $H_{мин.доп.}=15,8$ см; $U_{и}=65$ кВ - 50Гц)									
I	44	20,0	44–53,6	2,2–2,68	19,13	44–67,3	2,3–3,52	17,6	2,5–4,4
II	55	24,55	55–65,3	2,24–2,66	23,9	55–84,4	2,3–3,53	22,0	2,5–4,55
III	69	30,1	69–76,8	2,29–2,55	30,0	69–105,9	2,3–3,53	27,6	2,5–4,7
IV	84	33,9	84–85	2,48–2,51	33,6	84–118,6	2,5–3,53	33,6	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 35$ кВ; $U_{50} = 43,4$ кВ ( $H_{мин.доп.}=23,9$ см; $U_{и}=190$ кВ - +1,2/50 мкс)									
I	75	32,9	75–86,9	2,28–2,64	32,6	75–115	2,3–3,53	30,0	2,5–4,4
II	95	40,3	95–102	2,36–2,53	40,25	95–141,7	2,36–3,52	38,0	2,5–4,55
III	116	49,8	116–130	2,33–2,61	49,15	116–173	2,36–3,52	46,4	2,5–4,7
IV	140	56	134–141	2,39–2,51	56	140–197	2,5–3,52	56	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 110$ кВ; $U_{50} = 105$ кВ ( $H_{мин.доп.}=76,4$ см; $U_{и}=450$ кВ - +1,2/50 мкс)									
I	200	79,4	183–205	2,31–2,58	61,4	–	–	80,0	2,5–4,4
II	250	97,7	227–251	2,32–2,57	76,2	213–251	2,79–3,29	100	2,5–4,55
III	315	120,7	272–319	2,25–2,64	95,17	261–315	2,74–3,31	126	2,5–4,7
IV	390	138,8	287–391	2,07–2,82	114	292–390	2,56–3,42	156	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 150$ кВ; $U_{50} = 145$ кВ ( $H_{мин.доп.}=119,2$ см; $U_{и}=650$ кВ - +1,2/50 мкс)									
I	270	109,3	–	–	83,9	–	–	108	2,5–4,4
II	340	135	312–348	2,31–2,58	104,3	–	–	136	2,5–4,55
III	425	166	385–428	2,32–2,58	129,6	362–426	2,79–3,29	170	2,5–4,7
IV	535	191	400–535	2,09–2,8	156,9	403–535	2,57–3,41	214	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 220$ кВ; $U_{50} = 210$ кВ ( $H_{мин.доп.}=183,4$ см; $U_{и}=950$ кВ - +1,2/50 мкс)									
I	405	158,8	–	–	123,5	–	–	162	2,5–4,4
II	505	195,8	444–511	2,27–2,61	153	–	–	202	2,5–4,55
III	630	241,4	543–637	2,25–2,64	190,3	521–632	2,74–3,32	252	2,5–4,7
IV	790	278,2	570–790	2,05–2,84	230,3	585–790	2,54–3,43	316	2,5–4,85

$U_{НОМ} = 330 \text{ кВ}; U_{50} = 300 \text{ кВ} (H_{МИН.ДОП} = 224 \text{ см}; U_{И} = 950 \text{ кВ} - +250/2500 \text{ мкс})$									
I	580	226,6	528–580	2,33–2,56	176,9	–	–	232	2,5–4,4
II	725	279,9	633–736	2,26–2,63	219,7	–	–	290	2,5–4,55
III	905	345,4	770–919	2,23–2,66	272,6	744–905	2,73–3,32	362	2,5–4,7
IV	1120	397,2	818–1124	2,06–2,83	327,5	835–1120	2,55–3,42	448	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 500 \text{ кВ}; U_{50} = 440 \text{ кВ} (H_{МИН.ДОП} = 341 \text{ см}; U_{И} = 1230 \text{ кВ} - +250/2500 \text{ мкс})$									
I	840	332	–	–	258	–	–	336	2,5–4,4
II	1050	410	935–1070	2,28–2,61	320	–	–	420	2,5–4,55
III	1315	506	1139–1336	2,25–2,64	397	1092–1314	2,75–3,31	526	2,5–4,7
IV	1630	580	1212–1624	2,09–2,8	478	1224–1635	2,56–3,42	652	2,5–4,85
$U_{НОМ} = 750 \text{ кВ}; U_{50} = 665 \text{ кВ} (H_{МИН.ДОП} = 534 \text{ см}; U_{И} = 1550 \text{ кВ} - +250/2500 \text{ мкс})$									
I	1260	502	–	–	388	–	–	504	2,5–4,4
II	1575	618	1446–1575	2,34–2,55	482	–	–	630	2,5–4,55
III	1970	764	1734–2002	2,27–2,62	597	1654–1970	2,77–3,3	788	2,5–4,7
IV	2440	875	1838–2433	2,1–2,78	714	1856–2442	2,6–3,42	976	2,5–4,85

этом плане для изоляторов среднего класса напряжения вплоть до 20 кВ определяющим является кратковременное испытательное напряжение промышленной частоты в сухом состоянии. Для изоляторов 35–220 кВ значение  $H_{МИН.ДОП}$  обеспечивается при стандартном грозовом импульсе 1,2/50 мкс положительной полярности, а для изоляторов 330–750 кВ – при стандартном коммутационном импульсе 250/2500 мкс положительной полярности. Это, как правило, относится к изоляторам второй группы, предназначенным для эксплуатации в районах с I и II степенью загрязнения. Для таких районов загрязнения неприемлемыми оказываются и рекомендации [4–6], ибо даже при принятой в документе нижней границы  $L_y / H = 2,5$  не обеспечивается выполнение требования  $H \geq H_{МИН.ДОП}$ .

С учетом приведенного, в районах с I и II степенью загрязнения целесообразно использовать изоляторы первой группы, характеризующиеся относительно небольшими значениями  $L_y / H$ . Выгодно это и производителям продукции, поскольку позволяет им снижать расходы на изоляционный материал.

2. При нормированной длине пути утечки в районах с III и IV степенью загрязнения могут использоваться изоляторы среднего класса напряжения, входящие как в первую, так и вторую группы. При этом изоляторы первой группы по сравнению со второй имеют заметно меньший диапазон изменения  $L_y / H$ . Для рассматриваемого случая вполне приемлемыми оказываются и рекомендации [4–6] при  $L_y / H = 2,5$ .

3. При выборе габаритов изоляции классов напряжения 110–750 кВ обращает на себя внимание ряд характерных особенностей:

при нормированной длине пути утечки изоляторы первой группы могут использоваться, как правило, в районах с II–IV степенью загрязнения, а изоляторы второй группы – в основном в районах с III и IV степенью загрязнения. Примечательно, что при этом нормированная длина пути утечки соответствует верхней границе рекомендуемого диапазона изменения  $L_y / H$ , а нижняя граница этого диапазона оказывается заметно меньше. Это дает основание для безотлагательного обсуждения вопроса о необходимости пересмотра норм [2] на удельную длину пути утечки для изоляторов ВН и СВН;

при нормированной длине пути утечки изоляторов ВН и СВН даже при минимальном значении  $L_y / H = 2,5$  рекомендации IEC/TS 60815 приводят к сильно завышенным значениям высоты изоляции  $H$ . Так например, согласно рекомендациям [4–6] высота изоляционной части изоляторов 750 кВ, предназначенных для работы в районах с IV степенью загрязнения, должна быть не ниже 957 см. С учетом высоты фланцев изоляторов строительная высота опорной изоляции должна составлять не менее 11 м, что на 1–1,2 метра больше строительной высоты опорной изоляции десятков аппаратов класса напряжения 1150 кВ, успешно прошедших испытания на стенде МИС г. Тольятти на протяжении 8–10 лет в очень тяжелых условиях загрязнения, а также сотен конструкций на подстанциях опытно-промышленной линии электропередачи 1150 кВ «Экибастуз–Кокчетав–Кустанай» в течение 5–7 лет непрерывной работы;

рекомендации [4–6] по верхней границе диапазона  $L_y / H$  (см. табл. 3) существенно превышают предельно допустимые значения, полученные на основе экспериментально-расчетных данных

(см. рис. 3), что может привести к недопустимому снижению прочности изоляции. Так например, согласно [4–6] рекомендуемая верхняя граница  $L_y / H$  для IV степени загрязнения составляет 4,0. В то же время расчеты по (7) для второй группы изоляторов 750 кВ показывают, что уже при  $L_y / H = 3,65$  50%-е разрядное напряжение оказывается меньше требуемого значения  $U_{50} = 665$  кВ.

**Выводы.** 1. По степени влияния  $L_y / H$  на электрическую прочность загрязненной изоляции выделено две группы изоляторов со своими оптимальными значениями  $(L_y / H)_{\text{опт}}$ :

в первую группу входят изоляторы с  $(L_y / H)_{\text{опт}} \approx 2,5$ ;

во вторую – изоляторы с  $(L_y / H)_{\text{опт}} \approx 3,1$ .

При прочих равных условиях электрическая прочность изоляторов второй группы выше, чем первой.

2. Для двух групп изоляторов  $\cap$ -образный характер зависимостей ( $E_{50H} = F(L_y / H)$ ) позволил определить диапазоны изменения  $L_y / H$  ( $\Delta L_y / H$ ), внутри которых электрическая прочность изоляции высотой  $H$  оказывается не ниже нормированных значений. Указанные диапазоны  $\Delta L_y / H$  определяются классом напряжения изоляции, степенью ее загрязнения и принадлежностью изоляторов к одной из двух групп.

3. Рекомендации [4–6] с неоправданно завышенными нижней и верхними границами  $\Delta L_y / H$  неприемлемы для обоснованного выбора габаритов загрязненной изоляции.

4. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о необходимости пересмотра давно устаревшего ГОСТ [2] и модернизации [4–6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. – Л.: Энергия, 1969, 240 с.
2. ГОСТ 9920-89. Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции.

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 4, pp. 22–30.*

3. ГОСТ Р 55195. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

4. IEC/TS 60815-1. 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles.

5. IEC/TS 60815-2. 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems.

6. IEC/TS 60815-3. 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.

7. ГОСТ Р 56736-2015. Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Ч.1 Определения, информация и общие принципы.

8. ГОСТ Р 56736-2015. Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Ч.2 Керамические и стеклянные изоляторы для систем переменного тока.

9. ГОСТ Р 56736-2015. Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Ч.3 Полимерные изоляторы для систем переменного тока.

10. Остапенко Е.И., Годулян В.В., Мерхалев С.Д., Соломо-ник Е.И. Практика СССР по проектированию и выбору изоляции для загрязненных районов. – Электротехника, 1986, № 3, с. 23–26.

11. Годулян В.В., Трифонов В.З., Остапенко Е.И., Волкова О.В., Корявин А.Р. Электрическая прочность аппаратной изоляции сверхвысокого напряжения в условиях загрязнения. – Электротехника, 2004, № 2, с. 8–12.

12. Владимирский Л.Л., Кулясов А.Г., Тимофеева О.В., Ухин В.С., Шейко П.А. Грязестойкие опорные фарфоровые изоляторы для экранированных генераторных токопроводов: разработка и испытание. Сб. докладов VII симпозиума «Электротехника 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии», том III, № 6–12, Московская обл., май 2003 г.

13. Gutman I.Yu., Kinevsky V.R., Trifonov V.Z., Vladimirsky L.L., Yashin Yu.N. Dielectric strength of polluted EHV insulation. – CIGRE Session, 1988, report 33-08.

[26.01.2017]

*А в т о р: Корявин Алексей Родионович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1971 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию по исследованию электрического разряда в длинных воздушных промежутках. Начальник сектора ФГУП Всероссийского электротехнического института.*

## Problems of the Selection of External Insulation Intended for USE in Polluted Conditions

KORYAVIN Aleksei R. (All-Russian Institute of Electrical Engineering, Moscow, Russia) – Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

*The experimental data on electric strength of polluted support insulators are given. It is shown, that for the proved selection of dimensions of the insulation intended for use in polluted conditions, first of all, it is necessary to be guided not by creepage distance normalized nowadays, and on ranges of change of the relation of creepage distance to their insulation of part  $\Delta L_y / H$  within the framework of which required*



electric strength of insulators is provided. For insulators of a various class of a voltage and the normalized degrees of pollution the estimation of necessary ranges  $\Delta L_y / H$  is executed. It is shown, that the bottom and top boundaries of similar ranges  $\Delta L_y / H$ , normalized by Publications IEC/TS 60815, are strongly overestimated. Orientation to boundaries  $L_y / H$  recommended these documents can result in a selection of height of isolation with is inadmissible its low electric strength in comparison with required. The conclusion about expediency of revision of the out-of-date GOST 9920 normalizing creepage distance and modernization of Publications IEC/TS 60815 is made.

**Key words:** polluted support insulators, electric strength, creepage distance, the relation of creepage distance to their insulation of part

#### REFERENCES

1. **Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Kizeveter V.E.** *Elektricheskaya prochnost' naruzhnoi vysokovol'noi izolyatsii* (Dielectric strength of the outer high-voltage insulation). Leningrad, Publ. «Energiya», 1969, 240 c.
2. **GOST 9920-89.** *Elektrostanovki peremennogo toka na napryazheniye ot 3 do 750 kV. Dlina puti utechki vneshnei izolyatsii* (Standard 9920-89. Electrical installation AC voltage from 3 to 750 kV. Leakage distance of external insulation).
3. **GOST R 55195.** *Elektrooborudovaniye i elektroustanovki peremennogo toka na napryazheniye ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoi prochnosti izolyatsii* (Standard R 55195. (Electrical equipment and installation AC voltage from 1 to 750 kV. Requirements for electric insulating strength).
4. **IEC/TS 60815-1.** 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles.
5. **IEC/TS 60815-2.** 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems.
6. **IEC/TS 60815-3.** 2008. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.
7. **GOST R 56736-2015.** *Izolyatory vysokogo napryazheniya dlya raboty v zagryaznennykh usloviyakh. Vybory i opredeleniye razmerov. Ch. 1. Opredeleniya, informatsiya i obshchiye printsipy* (Standard R 56736-2015. High-voltage insulators for use in polluted conditions. Selection and sizing. Part 1. Definitions, information and general principles).
8. **GOST R 56736-2015.** *Izolyatory vysokogo napryazheniya dlya raboty v zagryaznennykh usloviyakh. Vybory i opredeleniye razmerov. Ch. 2. Keramicheskiye i steklyannyye izolyatory dlya sistem peremennogo toka* (Standard R 56736-2015. High voltage insulators for use in polluted conditions. Selection and sizing. Part 2. Ceramic and glass insulators for AC systems).
9. **GOST R 56736-2015.** *Izolyatory vysokogo napryazheniya dlya raboty v zagryaznennykh usloviyakh. Vybory i opredeleniye razmerov. Ch. 3. Polimernyye izolyatory dlya sistem peremennogo toka* (Standard R 56736-2015. High voltage insulators for use in polluted conditions. Selection and sizing. Part 3. Polymers insulators for AC systems).
10. **Ostapenko Ye.I., Gadulyan V.V., Merkhalev S.D., Solomonik Ye.I.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 1986, No. 3, pp. 23–26.
11. **Godulyan V.V., Trifonov V.Z., Ostapenko Ye.I., Volkova O.V., Koryavin A.R.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2004, No. 2, pp. 8–12.
12. **Vladimirskii L.L., Kulyasov A.G., Timofeyeva O.V., Ukhin V.S., Sheiko P.A.** Gryazestoikiye opornyye farforovyye izolyatory... – Sb. dokladov VII simpoziuma «Elektrotehnika 2010 god», Moskovskaya obl., Mai 2003, Tom III, No. 6–12.
13. **Gutman I.Yu., Kinevsky V.R., Trifonov V.Z., Vladimirsky L.L., Yashin Yu.N.** Dielectric strength of polluted EHV insulation. – CIGRE Session, 1988, report 33-08.

[26.01.2017]