

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

В.Г. КИСЕЛЁВ, А.А. КАЛЮТИК

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

В статье выполнен анализ и рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на энергетическую эффективность катодной защиты, определяемую соотношением электропроводности электролита, окружающего подземное (подводное) металлическое сооружение (трубопровод) и его поляризационного сопротивления. Полученные результаты справедливы, прежде всего, при наличии на трубопроводе современной качественной изоляции обладающей высокими диэлектрическими свойствами, изготовленной, например, на основе полимеров или их композиций, и рассчитаны, прежде всего, на использование их при защите от электрохимической коррозии подземных трубопроводов.

Ключевые слова: электрохимическая защита, катодная защита, коррозия, электрохимическая коррозия, комбинированная защита от коррозии.

1. Постановка проблемы

При разработке и производстве оборудования, конструкций и сооружений различного типа и назначения существенную роль играет их коррозионная стойкость. В последнее время для защиты от коррозии подземных металлических сооружений (ПМС) всё чаще используются комбинированные методы, включающие совместное применение покрытий и электрохимической защиты. Существующие нормативные документы, включая ГОСТ 9.602 – 2005 [1] и ГОСТ Р 51164 – 98 [2], требуют обеспечения определённого уровня поляризационного защитного потенциала, измеренного относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения. Так, например, для стальных подземных трубопроводов интервал допустимых значений колеблется от – 0,85 до – 1,15 вольт. В то же время известно, что достижение заявленной величины поляризационного потенциала практически невозможно без определённой величины омического падения потенциала в электролите, окружающем поляризуемый электрод. Следовательно, для проектирования эффективных систем катодной защиты необходим учёт этого обстоятельства. К сожалению, существующие нормативные документы, в частности РД 153-39.4-091-01 [3], никоим образом не рассматривают данную проблему. Данная статья является попыткой решения этой задачи с целью наиболее экономичного обеспечения необходимого защитного потенциала, в соответствии с ГОСТ 9.602 – 2005 [1], на всём протяжении защитной зоны трубопровода.

2. Основные принципы катодной защиты от коррозии подземных металлических сооружений

Катодная защита от коррозии наложенным током (в дальнейшем катодная защита или электрохимическая защита), в случае ПМС, используется, в основном, для защиты от почвенной коррозии, а также и для защиты от коррозии, вызываемой постоянными и переменными блуждающими токами. Современные устройства

катодной защиты представляют собой, как правило, выпрямители переменного тока, снабжённые специальными блоками, обеспечивающими автоматическое регулирование электрических характеристик электрохимической защиты. В качестве основного параметра, подлежащего регулировке, обычно выбирается электрохимический потенциал защищаемого сооружения по отношению к грунту. При отсутствии особых условий агрессивности его поддерживают в границах от $-0,85$ до $-1,15$ вольт. Измерения в этом случае проводят, как правило, с использованием медно-сульфатных электродов сравнения.

В соответствии с *DIN 30676* [4] необходимыми предпосылками для осуществления качественной электрохимической защиты от коррозии являются:

- обеспечение высокой продольной проводимости трубопроводов (отсутствие изолирующих фланцев, устранение соединений в трубопроводе с высоким электрическим сопротивлением и т. д.);

- отсутствие контактов с заземленными сооружениями (заземляющими устройствами, арматурой железобетонных фундаментов, другими подземными металлическими сооружениями, не подлежащими катодной защите и т. д.);

- наличие качественной диэлектрической изоляции.

Будем считать, что все эти требования, безусловно, выполнены, и приступим собственно к расчёту основных параметров катодной защиты как функции удельного сопротивления грунта в зоне расположения ПМС при наличии у него современной диэлектрической изоляции. В качестве объекта защиты выберем отдельно расположенный трубопровод, находящийся в грунте и имеющий качественное, например полиэтиленовое, антикоррозионное покрытие.

Основные принципы катодной защиты хорошо известны, а её особенности, связанные с различными свойствами диэлектрической изоляции трубопровода изложены, например, в публикации «Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений» [5]. Особенности гальванической защиты изложены в статье «Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений» [6]. Воспользуемся некоторыми данными, полученными в этих работах, для оценки влияния на коэффициент полезного действия установки катодной защиты ПМС удельного сопротивления грунта, в котором находится трубопровод. Пусть трубопровод характеризуется, например, следующими параметрами: удельное сопротивление материала (стали) ρ_s равно $0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; наружный диаметр трубопровода d равен 321 мм; s – толщина стенки трубопровода ($s = 6$ мм); антикоррозионное покрытие изготовлено из полиэтилена. В соответствии со справочными данными [7] удельный защитный ток j_s в этом случае для трубопроводов, проложенных в грунте, изменяется в пределах от 10^{-5} до 10^{-6} ампер на квадратный метр.

Основываясь на этих данных и в соответствии с методикой предложенной в работе [5] рассчитаем основные параметры катодной защиты рассматриваемого трубопровода для плотности защитного тока j_s , равной 10^{-5} ампер на квадратный метр.

3. Определение основных параметров катодной защиты ПМС

3.1 Определение величины защитной зоны трубопровода

Определение величины защитной зоны трубопровода будем проводить при условии наличия омического падения потенциала в его зоне защиты равном 0,3 вольта по формуле [7]:

$$2L = \sqrt{\frac{2,4s}{\rho_s j_s}}, \quad (1)$$

где: j_s – плотность защитного тока; ρ_s – удельное сопротивление стали; s – толщина стенки трубопровода.

Расчёт будем вести при выбранном значении плотности защитного тока и других параметров, предложенных ранее. Представим зависимость величины защитной зоны трубопровода, вычисленную по формуле (1), от плотности защитного тока и численных характеристик защищаемого объекта в табличной форме (табл. 1).

3.2. Определение величины защитного тока.

Для определения величины защитного тока I_0 можно воспользоваться следующей формулой [7]:

$$I_0 = 2\pi d j_s L. \quad (2)$$

Расчёт будем вести при выбранном значении плотности защитного тока и других параметров, предложенных ранее. Внесём полученные данные в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры, характеризующие зону защиты трубопровода

$J_s,$ А/м ²	$2L,$ км	$I_0,$ А
0 ⁻⁵	89,443	0,902

Как видно из данной таблицы, выбранная плотность защитного тока (j_s , А/м²), определяет протяжённость зоны катодной защиты трубопровода ($2L$, км) и защитный ток трубопровода (I_0 , А). Однако в соответствии с расчётными формулами как зона защиты, так и общий защитный ток не зависят от удельного сопротивления грунта. Фактически, конечно, такая зависимость существует, но она «прячется» в параметре «плотность защитного тока». Рассмотрим, как определяется эта величина и её влияние на коэффициент полезного действия катодной защиты.

4. Определение влияния на коэффициент полезного действия катодной защиты удельного сопротивления грунта в зоне расположения трубопровода

Первым этапом проектирования любой электрохимической защиты является определение необходимой плотности защитного тока J_s . Оценить значение этой величины можно либо экспериментально, при наличии уже построенного ПМС, либо теоретически, при проектировании нового подземного металлического сооружения с использованием соответствующих нормативных документов, например соответствующей инструкции [3]. При этом очевидно, что затраты на электрохимическую защиту будут снижаться с уменьшением величины защитного тока. Снижение этого параметра добиваются, прежде всего, путём создания качественной изоляцией ПМС и устранением контактов подземного металлического сооружения с другими металлическими сооружениями, соприкасающимися с грунтом. Кроме того, при катодной защите трубопроводов уменьшению затрат на её осуществление способствует и увеличение их продольной проводимости. При этом экспериментальное определение необходимой величины защитного тока всегда сопровождается измерением поляризационного потенциала ПМС, на величину которого, в соответствии с его определением, омическое падение потенциала в электролите не оказывает никакого влияния. Однако измерение данного параметра всегда сопряжено с исключением омического падения потенциала на дефекте, которое уже является функцией удельного сопротивления грунта, размера и формы дефекта и толщины покрытия. Похожая проблема возникает и при осуществлении собственно катодной защиты. В этом случае принимая, что собственная проводимость диэлектрического покрытия крайне мала по сравнению с проводимостью дефектов (что

доказывается, в частности, в работах [8, 9]), для расчёта сопротивления дефекта круглой формы можно воспользоваться следующими соотношениями [7]:

– формула, определяющая поляризационное сопротивление дефекта:

$$R_p = \frac{r_p}{A}, \quad (3)$$

где r_p – удельное поляризационное сопротивление металлической поверхности в зоне дефекта покрытия (в соответствии со справочными данными [7] $r_p = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$), а A – площадь дефекта покрытия;

– формула, определяющая сопротивление покрывного слоя, возникающего на поверхности металла в процессе работы установки катодной защиты:

$$R_D = \frac{r_d}{A}, \quad (4)$$

где r_d – удельное сопротивление покрывного слоя, возникающего при длительной работе установки катодной защиты;

– формула, определяющая сопротивление грунта в дефекте круглой формы:

$$R_F = \frac{\rho l}{A}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, а l толщина слоя диэлектрического покрытия трубопровода.

– формула, определяющая сопротивление растекания дефекта круглой формы:

$$R_S = \frac{\rho}{2a}, \quad (6)$$

где a – диаметр дефекта круглой формы.

Очевидно, что общее сопротивление дефекта R в этом случае представляет собой сумму поляризационного R_p и омического R_G сопротивлений и определяется следующей формулой:

$$R = R_p + R_G, \quad (7)$$

где, в свою очередь, R_G определяет омическое падение потенциала в дефекте и может быть рассчитано с использованием следующей простой формулы:

$$R_G = R_D + R_F + R_S. \quad (8)$$

При этом необходимо отметить, что сопротивление покрывного слоя R_D , образующегося при относительно длительной работе установки катодной защиты, по определению, мало зависит от удельного сопротивления грунта. Следовательно, в рамках заявленной темы статьи его можно не рассматривать, принимая, что система находится в состоянии, когда, например, покрывной слой отсутствует. Данная ситуация возможна как при малом времени работы катодной защиты, так и в кислых грунтах, в которых образование покрывного слоя весьма затруднено.

Для определения влияния удельного сопротивления грунта в зоне расположения трубопровода на коэффициент полезного действия установки катодной защиты по постоянному току (без учёта потерь в преобразователе) можно воспользоваться следующими модельными представлениями.

Пусть трубопровод имеет диэлектрическое, например полиэтиленовое, покрытие толщиной 5 мм (удельное сопротивление полиэтилена ρ_D составляет порядка $10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Лабораторные и практические измерения показывают [8], что при длительном нахождении в грунте удельное сопротивление полиэтилена снижается приблизительно на два–три порядка, т. е. составляет приблизительно $10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Обозначим эту величину ρ_u .

Пусть, начиная с точки дренирования тока, на трубопроводе равномерно расположены дефекты круглой формы и одинаковых размеров.

Пусть площадь каждого дефекта составляет 6,25 см², т. е. равняется площади датчика потенциала при измерениях поляризационного потенциала, проводимых в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.602 – 2005 [1].

Пусть удельное сопротивление грунта в зоне расположения трубопровода меняется от 0 до 100 Ом·м с шагом в десять Ом·м.

Основываясь на этих исходных положениях, рассчитаем параметры катодной защиты.

Сопротивление изоляции трубопровода, при длине защитной зоны 89,443 км, соответствующей плотности защитного тока $j_s = 10^{-5}$ А/м² и общей его величине $I_0 = 0,902$ А. Известно, что общее сопротивление изоляции в этом случае будет выражаться следующей формулой:

$$R_{и} = \rho_{и} \frac{1}{2\pi dL}. \quad (9)$$

Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления, тогда получим, что $R_{и} = 5,55 \cdot 10^9$ Ом, что, как мы увидим в дальнейшем, значительно больше сопротивления дефектов изоляции. Следовательно, данная величина может не учитываться в последующих расчётах.

Расчёт поляризационного сопротивления дефекта R_p в зависимости от удельного сопротивления грунта будем проводить по формуле (3). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Получим, что поляризационное сопротивление не зависит от сопротивления грунта, т. е. остаётся постоянным при изменении данного параметра (его величина, в соответствии с расчётом, составит для одного дефекта выбранных размеров величину: $R_p = 1600$ Ом). Полученные данные внесём в табл. 2.

Таблица 2

Технические параметры катодной защиты наложенным током трубопровода, определяемые при различных величинах удельного сопротивления грунта в зоне расположения ПМС

ρ , Ом·м	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R_p , кОм	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
R_F , кОм	0	0,08	0,160	0,240	0,320	0,400	0,480	0,560	0,640	0,720	0,800
R_S , кОм	0	0,177	0,355	0,532	0,709	0,887	1,063	1,241	1,418	1,596	1,773
R_G , кОм	0	0,257	0,515	0,772	1,029	1,287	1,544	1,801	2,058	2,316	2,573
$R_{p,ср}$, кОм	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
n , шт	4811	4811	4811	4811	4811	4811	4811	4811	4811	4811	4811
$\overline{R_{p,ср}}$, Ом	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499
$\overline{R_G}$, Ом	0	0,053	0,107	0,160	0,214	0,268	0,321	0,374	0,428	0,481	0,535
$P_{pдт}$, Вт	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406	0,406
$P_{fст}$, Вт	0	0,043	0,087	0,130	0,174	0,218	0,261	0,304	0,348	0,392	0,435
U_K , В	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P_k , Вт	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804	1,804
R_A , Ом	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P_A , Вт	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814	0,814
P_{np} , Вт	3,024	3,077	3,111	3,154	3,198	3,242	3,285	3,328	3,372	3,416	3,459
η_i , %	13,4	13,2	13,1	12,9	12,7	12,5	12,4	12,2	12,0	11,9	11,7

Расчёт омического сопротивления грунта в дефекте R_F в зависимости от удельного сопротивления грунта будем проводить по формуле (5). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Полученные данные внесём в табл. 2.

Расчёт сопротивления растекания дефекта R_S в зависимости от удельного сопротивления грунта будем проводить по формуле (6). Подставим в неё численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Полученные данные внесём в табл. 2.

Расчёт омического падения потенциала в дефекте R_G будем определять по формуле (8), которая, учитывая, что по принятым нами условиям сопротивление покрывного слоя, возникающего при длительной работе установки катодной защиты, равно нулю ($R_D = 0$), будет выглядеть следующим образом:

$$R_G = R_F + R_S. \quad (10)$$

Подставим в формулу (10) численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, и проведём вычисления. Полученные данные поместим в табл. 2.

Расчёт среднего поляризационного сопротивления дефекта по всей зоне защиты ПМС будем производить исходя из общих условий определения защитной зоны трубопровода, в соответствии с которыми поляризационный потенциал меняется от $-0,85$ до $-1,15$ вольт по медно-сульфатному электроду сравнения. Однако удельное поляризационное сопротивление r_p в этих условиях меняется от своего минимального значения $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ на периферии защитной зоны до своего максимально возможного значения $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ вблизи точки дренирования. Очевидно, что среднее значение поляризационного сопротивления для всей зоны защиты ПМС в этом случае будет равно $1,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Подставим это значение удельного поляризационного сопротивления, наряду с указанной ранее величиной площади дефекта (A), в формулу (3) и произведём вычисления. Полученный результат $R_{p,ср}$ внесём в табл. 2.

Расчёт количества дефектов круглой формы для защитной зоны протяжённостью $89,443 \text{ км}$ можно произвести исходя из величины защитного тока $I_0 = 0,902 \text{ А}$, плотности защитного (поляризационного) тока в дефекте j_p , равной $0,3 \text{ А/м}^2$ и выбранной площади одного дефекта $A = 6,25 \text{ см}^2$ по следующей формуле:

$$n = \frac{I_0}{j_p A}. \quad (11)$$

Подставим численные значения соответствующих величин в формулу (11) и произведём вычисления. Полученный результат величины $n = 4811$ внесём в табл. 2.

Полученное значение количества дефектов, в силу параллельности их включения, позволяет рассчитать как общее среднее поляризационное $\overline{R_{p,ср}}$, так и общее омическое сопротивление $\overline{R_G}$ дефектов трубопровода. Сделаем это путём деления соответствующих величин на количество дефектов и внесём полученный результат в табл. 2.

Мощность P_{PDT} , выделяющуюся на поляризационном сопротивлении трубопровода, будем считать по следующей формуле:

$$P_{PDT} = I_0^2 \overline{R_{p,ср}}. \quad (12)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 2.

Мощность P_{FST} , выделяющуюся на сопротивлении грунта в дефектах трубопровода, будем считать по следующей хорошо известной формуле:

$$P_{FST} = I_0^2 \overline{R_G}. \quad (13)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 2.

Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на омическом сопротивлении кабеля.

Примем что падение потенциала в кабеле цепи постоянного тока составляет два вольта [10], и внесём эти данные в табл. 2. Мощность P_k , выделяющуюся на

сопротивлении кабеля в цепи постоянного тока установки катодной защиты, будем считать по следующей формуле:

$$P_k = I_0 U_K. \quad (14)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 2.

Расчет мощности в цепи постоянного тока установки катодной защиты, расходуемой на сопротивление растекания анодного заземления.

Примем, для удобства сравнения различных вариантов катодной защиты, что сопротивление растекания анодного заземления R_A во всех рассматриваемых случаях составляет один Ом, и внесём эти данные в табл. 2. Мощность P_A , выделяющуюся на сопротивлении растекания анодного заземления, будем считать по формуле

$$P_A = I_0^2 R_A. \quad (15)$$

Результаты вычислений поместим в табл. 2.

Расчет коэффициента полезного действия катодной защиты по постоянному току η_i в зависимости от удельного сопротивления грунта в зоне расположения трубопровода будем производить с использованием традиционного для этого случая соотношения:

$$\eta_i = \frac{P_{PDT}}{P_{пр}}; \quad (16)$$

$$P_{пр} = P_{PDT} + P_{FST} + P_k + P_A. \quad (17)$$

$P_{пр}$ определяет необходимую мощность преобразователя катодной защиты по постоянному току. Результаты вычислений поместим в табл. 2.

5. Анализ результатов

Приведенные в табл. 2 результаты расчетов показывают устойчивую тенденцию роста коэффициента полезного действия катодной защиты, при защите подземных (подводных) трубопроводов, с уменьшением удельного сопротивления грунта (электролита) в зоне расположения трубопровода. Однако рост коэффициента полезного действия системы катодной защиты по постоянному току при принятых нами условиях составляет всего несколько процентов, что с экономической точки зрения несущественно. В то же время, при сокращении величин U_K и R_A , что вполне реально и достижимо, рост η_i может составлять уже десять и более процентов. В этом случае, особенно в городских условиях, когда защитный ток часто составляет сорок и более ампер, а количество установок, например на территории Санкт-Петербурга, более трёх тысяч, экономический эффект от рационального выбора трассы трубопровода может быть весьма существенным. Кроме того, рост удельного сопротивления грунта в зоне расположения трубопровода увеличивает по абсолютной величине градиент потенциала в зоне расположения ПМС, что, в соответствии с пунктом 4.7 ГОСТ 9.602 - 2005 [1], увеличивает опасность влияния блуждающих токов на смежные подземные металлические сооружения.

Данные обстоятельства, к сожалению, не находят отражения в отечественных нормативных документах по проектированию систем катодной защиты, в частности защиты трубопроводов, снабжённых современной качественной диэлектрической изоляцией, конструируемой, как правило, на основе полимеров. Это затрудняет выбор наиболее экономичного и безопасного варианта катодной защиты ПМС.

Выводы

1. Рассмотрено влияние удельного сопротивления грунта в зоне расположения подземного трубопровода на коэффициент полезного действия установки катодной защиты по постоянному току η_i , определяемого отношением поляризационного сопротивления трубопровода к сумме омических сопротивлений по постоянному току системы катодной защиты.

2. Показано, что при фиксированных геометрических параметрах дефектов, при наличии современного диэлектрического, например полиэтиленового, покрытия, с ростом удельного сопротивления грунта наблюдается снижение η_r , которое сопровождается ростом опасного влияния блуждающих токов на соседние подземные металлические коммуникации.

Summary

In the article analysis and describes the main factors influencing the energy efficiency of cathodic protection determined by the ratio of the conductivity of the electrolyte surrounding the underground (submerged) metallic structure (piping) and its polarization resistance. Our results are valid primarily if the pipeline of a modern high-quality insulation with high dielectric properties is made, for example, based on polymers or their compositions and are designed primarily for their use in protection against electrochemical corrosion of underground pipelines.

Keywords: *electrochemical protection, cathodic protection, corrosion, electrochemical corrosion, combined corrosion protection.*

Литература

1. ГОСТ 9.602 – 2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 55 с.
2. ГОСТ Р 51164 – 98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России. 1998. 41 с.
3. РД 153-39.4-091-01 Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. Санкт-Петербург.: Издательство ДЕАН, 2002. 240 с.
4. DIN 30 676. Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz.
5. Киселев В.Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2011 № 4 (135). С. 111 – 116.
6. Киселев В.Г. Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2011 № 3 (130). С. 75 – 80.
7. Baeckmann W. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Essen.: Vulkan-Verlag, 1996. 339 S.
8. Baeckmann W. und Schwenk W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Weinheim.: Verlag Chemie. 1980. 465 S.
9. Киселев В.Г. Снижение потребления тока установками катодной защиты от коррозии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2013 № 4-1 (183). С. 93 – 99.
10. Bette Ulrich. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz./ Ulrich Bette, Wolfgang Vesper Essen.: Vulkan-Verlag, 2005. 367 S.

Поступила в редакцию

29 января 2016 г.

Киселев Владимир Геннадьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ). Тел: 8(921)7572717. E-mail: kis_vg@mail.ru.

Калютник Александр Антонович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ). Тел: 8(905)2605955. E-mail: Kalyutik@yandex.ru.

© Проблемы энергетики, 2015, № 11-12