



УДК 621.311.22(075.8)

В.Г. Киселёв

СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОКА УСТАНОВКАМИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

V.G. Kiselev

REDUCTION IN THE CURRENT DRAIN BY THE INSTALLATIONS OF CATHODIC PROTECTION

В статье выполнены анализ и систематизация основных факторов, оказывающих влияние на потребление тока системой катодной защиты подземных металлических коммуникаций от коррозии. Подробно рассмотрены и систематизированы причины, оказывающие влияние на потребление тока и потери мощности в цепи постоянного тока электрохимической защиты от коррозии, и приведены практические рекомендации по их снижению.

КОРРОЗИЯ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ЗАЩИТА ОТ НАРУЖНОЙ КОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ.

In the article is produced the analysis and the systematization of the basic factors, which have an effect on current drain by the system for the cathode protection of underground metallic communications from corrosion. The basic reasons, which have an effect on the current drain and power loss in the direct-current circuit of electrochemical corrosion protection, are in detail examined and systematized, and practical recommendations regarding their decrease are given.

CORROSION. ELECTROCHEMICAL CORROSION. CATHODIC PROTECTION. ELECTROCHEMICAL CORROSION PROTECTION. PROTECTION FROM THE EXTERNAL CORROSION OF UNDERGROUND METALLIC COMMUNICATIONS.

При разработке, строительстве и эксплуатации энергетических объектов различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. Защита от коррозии является технико-экономической проблемой, и, следовательно, при выборе конкретных антикоррозионных мероприятий требуется учет их стоимости. Кроме того, вид конкретного антикоррозионного мероприятия в значительной степени определяет надежность энергетического оборудования, работающего в агрессивных условиях. В последние годы отмечены резкий рост отказов, возникающих при эксплуатации подземных металлических коммуникаций (ПМК), в первую очередь по причине низкой эффективности их антикоррозионной защиты, и, следовательно, повышенные затраты на их ремонт и обслуживание. Кроме того, аварии приводят к усилению социальной напряженности в обществе, что особенно характерно для крупных городов. В силу

этого особую актуальность приобретают мероприятия по повышению надежности и снижению стоимости комбинированной антикоррозионной защиты ПМК, рассмотрению экономической эффективности которой и посвящена данная статья.

Основные направления оценки экономической эффективности комбинированной антикоррозионной защиты ПМК

В соответствии с ГОСТ 9.602–2005 [1] и ГОСТ Р 51164–98 [2] критерием технической эффективности комбинированной защиты от коррозии, включающей как защитное антикоррозионное покрытие, так и электрохимическую защиту (ЭХЗ), является выполнение двух групп требований:

к защитному покрытию (качество антикоррозионных материалов, технологии нанесения покрытия, свойства готового покрытия);

к величине защитного потенциала без его омической составляющей (поляризационный потенциал), который, как правило, должен находиться в пределах от $(-0,85)$ до $(-1,15)$ В по медно-сульфатному электроду сравнения в течение всего срока службы объекта.

В рамках данной работы будем считать, что указанные технические условия безусловно выполнены, и, следовательно, основной проблемой возникающей при оценке экономической эффективности комбинированной защиты от коррозии является оптимизация параметров именно электрохимической (катодной) защиты, поскольку оценка экономической эффективности покрытий обычно не представляет затруднений и эти данные широко распространены в специальной литературе. Такой подход позволяет считать «полезной работой» работу, затрачиваемую системой катодной защиты для достижения поляризационного потенциала, т. е. осуществляемую для смещения потенциала сооружения от его стационарной величины (коррозионный потенциал φ_k) до его защитного потенциала без омической составляющей (φ_3). Поляризационный потенциал, как было уже сказано, должен находиться в пределах от $(-0,85)$ до $(-1,15)$ В по медно-сульфатному электроду сравнения.

В зависимости от конкретных условий коррозии φ_k изменяется, хотя и не очень сильно. Эти колебания, которые обычно составляют величину порядка нескольких десятых вольта, обусловлены характером грунта, степенью его аэрации, влажности и рядом других причин. Также и φ_3 — величина не постоянная, но ее изменения в пределах, указанных ранее, обусловлены прежде всего требованиями заказчика и квалификацией проектировщика, а также возможностями конкретной установки катодной защиты. Следовательно, оптимизация параметров электрохимической защиты привязана в определенных пределах к конкретным условиям, и корректное сравнение различных систем ЭХЗ возможно только с учетом этого обстоятельства.

Все остальные затраты, связанные с прохождением электрического тока при катодной защите ПМК, можно отнести к потерям (прежде всего к тепловым потерям), которые целесообразно разбить на следующие пять групп:

связанные с преобразованием переменного электрического тока в постоянный ток;

связанные с излишне высоким защитным потенциалом ПМК, обусловленные недостаточной эффективностью системы регулировки защитного потенциала;

потери в цепи линии переменного (питающего) тока;

потери в цепи постоянного (защитного) тока; обусловленные низким уровнем мероприятий по сокращению защитного тока на ПМК.

Рассмотрим эти группы несколько подробнее. Первые две группы тесно связаны с существующим уровнем техники в области источников постоянного тока для катодной защиты и систем регулировки, в том числе автоматической регулировки защитного потенциала, и в основном определяются рынком соответствующей продукции. Поэтому учет их влияния на экономическую эффективность ЭХЗ при конкретных условиях проектирования относительно прост и не требует специального рассмотрения. Третья группа в значительной степени определяется взаиморасположением ПМК и источников переменного тока, и, следовательно, корректное ее рассмотрение невозможно без соответствующих данных. С другой стороны, при их наличии учет влияния потерь в линии питания на экономическую эффективность катодной защиты не представляет серьезных затруднений, и поэтому в силу ограниченного объема статьи анализ этого здесь не приводится.

Значительно большее влияние на уровень стоимости строительства и эксплуатации систем катодной защиты оказывают потери, указанные в пунктах третьем и четвертом. Поэтому остановимся на их анализе несколько подробнее.

Потери в цепи защитного тока и основные способы их сокращения

Анализу процессов, протекающих в цепи защитного тока, в последнее время уделяется большое внимание. Так, например, в справочнике по катодной защите [3] этот анализ проведен для морских сооружений (шпунтовая стена) с использованием следующей формулы:

$$P_{\underline{}} = R_{Kreis} i_s^2 A^2 + 2i_s AP + P^2 / R_{Kreis}, \quad (1)$$

где $P_{\underline{}}$ — мощность по постоянному току, расходуемая на катодную защиту; i_s — плотность

защитного тока; A — площадь защищаемой поверхности; P — смещение поляризационного потенциала защищаемой поверхности; R_{Kreis} — омическое падение напряжения на всех элементах цепи защитного тока (в данной формуле отдельно не учитывается анодная поляризация).

Использование формулы (1) для анализа экономической эффективности ПМК, помимо относительно легко преодолимых трудностей, обусловленных различием объектов и коррозионных сред, имеет и более существенные недостатки, связанные с отсутствием в рамках заявленного подхода возможности для анализа электрохимических процессов, протекающих в системе катодной защиты, и их влияния на потребляемую мощность. Значительно более удобным и наглядным является метод анализа с применением напряжений, который широко используется для оценки эффективности электрохимических процессов. В этом случае обычно применяется следующая формула:

$$E = (E_a - E_k) + |\eta_a| + |\eta_k| + E_{Э-т} + E_{конт} + E_{соед пр}, \quad (2)$$

где E — напряжение на выходе преобразователя катодной защиты; E_a — стационарный (коррозионный) потенциал анодного заземления; E_k — стационарный (коррозионный) потенциал защищаемого сооружения. $|\eta_a|$ и $|\eta_k|$ — абсолютные величины соответственно анодного и катодного перенапряжения; $E_{Э-т}$ — падение напряжения на сопротивлении электролита; $E_{конт}$ — падение напряжения на контактах в цепи постоянного тока; $E_{соед пр}$ — падение напряжения на соединительных проводах (кабели) цепи постоянного тока.

Проведем краткий анализ влияния отдельных составляющих формулы (2) на величину потерь в цепи постоянного тока:

Влияние величины $(E_a - E_k)$. E_a и E_k определяются конкретными условиями коррозии анодного заземления и подземного металлического сооружения (ПМС). Колебания этих величин обычно составляют несколько десятых вольта, а токи в цепи постоянного тока крайне малы, что приводит к незначительному влиянию этих параметров на значение потерь мощности в этой цепи. Кроме того, необходимо отметить, что при использовании анодов, изготовленных

из электроотрицательных материалов, при их растворении вместо потерь будет получен некоторый выигрыш в электрической мощности за счет использования их химической энергии. Все это приводит к тому, что при практических расчетах данный фактор, как правило, не принимают во внимание.

Влияние анодного перенапряжения η_a . На основании практических измерений [4] при катодной защите ПМК в грунте установлено, что на анодном заземлении за счет торможения электрохимического процесса наблюдается падение потенциала в пределах от одного до двух вольт. Это достаточно большая величина (она, как правило, составляет от 10 до 20 % общего падения напряжения на анодном заземлении при катодной защите в грунте). Поэтому ее формирование требует специального анализа. Рассмотрение будем проводить для электрохимического процесса любого типа. В общем виде с использованием традиционных обозначений он может быть представлен в следующей форме:

$$Ox + ze \leftarrow R. \quad (3)$$

Здесь знаком « \leftarrow » показано направление (анодное) реакции. В соответствии с кинетической теорией электрохимических процессов анодный ток \bar{i} (катодным током в этом случае можно пренебречь) будет определяться следующим уравнением [5]:

$$\bar{i} = i_0 e^{-\frac{A}{RT} e^{-\frac{(az-z_{Ox})\zeta}{RT} e^{\frac{(1-\alpha)zF\eta_a}{RT}}}}, \quad (4)$$

где i_0 — ток обмена, который, в свою очередь, определяется формулой

$$i_0 = zFk_0 C_{Ox}^{1-\alpha} C_R^\alpha, \quad (5)$$

или

$$i_0 = i_{cto} C_{Ox}^{1-\alpha} C_R^\alpha, \quad (6)$$

z — число электронов, принимающих участие в электрохимической реакции; F — число Фарадея; i_{cto} — стандартный ток обмена, $i_{cto} = zFk_0$; C_R и C_{Ox} — концентрации соответственно восстановленного и окисленного компонентов электрохимического процесса. Экспоненты, входящие в уравнение (4), ответственны за различные параметры электрохимической реакции.

Так $e^{-\frac{A}{RT}}$ отвечает за наличие ингибиторов

(энергия активации $A > 0$) или активаторов процесса (энергия активации $A < 0$). Соответственно R и T в этом выражении, как и в дальнейшем, обозначают универсальную газовую постоянную

и абсолютную температуру. Экспонента $e^{\frac{(\alpha z - z_{Ox})\zeta}{RT}}$ ответственна за изменение тока при наличии потенциала; α и z_{Ox} обозначают соответственно коэффициент распределения и заряд окисленного компонента реакции (3). Наконец, величина $e^{\frac{(1-\alpha)zF\eta_a}{RT}}$ характеризует зависимость анодного тока \bar{i} от величины анодного перенапряжения η_a на жертвенных анодах.

Для получения зависимости η_a ($\eta_a > 0$) от различных параметров прологарифмируем уравнение (4) с учетом равенств (5) и (6). Тогда получим следующее соотношение

$$\eta_a = -\frac{RT}{(1-\alpha)zF} \ln i_{\text{cto}} - \frac{RT}{zF} \ln C_{Ox} - \frac{RT}{zF} \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln C_R - \frac{\alpha z - z_{Ox}}{(1-\alpha)z} \zeta + \frac{RT}{(1-\alpha)zF} \ln |i_a|. \quad (7)$$

Точный расчет анодного перенапряжения весьма затруднен в силу многообразия и изменчивости видов почвенного электролита и широкого диапазона возможных потенциалов при реальной катодной защите ПМК, однако формула (7) позволяет наглядно показать основные возможности снижения величины η_a . Действительно, рост i_{cto} , C_{Ox} и C_R способствует снижению анодного перенапряжения, в то время как рост по абсолютной величине анодного тока ($i_a < 0$) его повышает. Потенциал ζ в зависимости от знака заряда реагирующих частиц может способствовать как повышению, так и понижению анодного перенапряжения. Однако на практике его влияние крайне мало и с трудом поддается учету, поэтому обычно этой величиной пренебрегают. Совокупный анализ формул (3)–(7) позволяет сделать рекомендовать для снижения величины анодной поляризации следующее:

контролировать возможное наличие ингибиторов и устранять их с заменой активаторами анодного процесса;

снижать величину ζ - потенциала, в частности путем добавления легкорастворимых соединений, с целью локализации перенапряжения в плотной части двойного электрического слоя;

увеличивать плотность тока обмена i_0 за счет использования легкорастворимых анодных материалов и повышения концентрации растворителя с соответствующим повышением концентрации компонентов, принимающих участие в анодном процессе.

Этот перечень рекомендаций не является исчерпывающим, так как помимо чисто электрохимического перенапряжения существуют и другие его виды, но их рассмотрение выходит за рамки данной статьи. Кроме того, следует отметить, что влияние других видов перенапряжения может приводить к катастрофическому выходу из строя анодных заземлений. Такие явления наблюдались при значительных анодных токах в высокоминерализованных грунтовых водах и сопровождалась образованием диэлектрических отложений на поверхности жертвенных анодов.

Влияние величины катодного перенапряжения

η_k . По аналогии с анодным перенапряжением для величины катодного перенапряжения на ПМК можно получить следующую формулу:

$$\eta_k = \frac{RT}{\alpha z F} \ln i_{\text{cto}} + \frac{RT}{z F} \frac{1-\alpha}{\alpha} \ln C_{Ox} + \frac{RT}{\alpha z F} \ln C_R + \frac{\alpha z - z_{Ox}}{z} \zeta - \frac{RT}{\alpha z F} \ln |i_k|. \quad (8)$$

Катодный ток в этой формуле считается положительным ($i_k > 0$), а катодная поляризация — отрицательной ($\eta_k < 0$). По аналогии с влиянием анодного перенапряжения рост (по абсолютной величине) катодного перенапряжения наблюдается при сокращении i_{cto} , C_{Ox} , C_R и увеличении i_k . Однако для минимизации потерь в цепи защитного тока, в отличие от анодной поляризации, для η_k , наоборот, требуется максимальный рост при возможно малом защитном токе. В этом случае рост потерь мощности, обусловленный собственно катодной поляризацией защищаемого сооружения, с лихвой перекрывается выигрышем энергии на других сопротивлениях в цепи постоянного тока, а анализ формулы (8) позволяет сделать следующие рекомендации по увеличению абсолютной величины катодной поляризации:

контролировать возможное наличие активаторов реакции и устранять их заменой ингибиторами катодного процесса;

снижать плотность тока обмена i_0 путем снижения концентрации окислителя (кислород, ионы водорода и т. д.) или, в случае наличия такой возможности, подбором соответствующих материалов для ПМК.

Как и в случае анодной поляризации, данный перечень не является исчерпывающим, ибо помимо чисто электрохимического перенапряжения существуют и другие его виды.

Влияние величины падения напряжения $E_{\text{конт}}$ на контактах в цепи постоянного тока. Из практики известно, что обычно падение напряжения на всех контактах в цепи постоянного тока ограничено величиной 0,05 В. Однако и это падение потенциала при больших токах защиты может вызывать потери мощности до 5 Вт и более, что при ухудшении качества соединений может приводить к катастрофическому выходу из строя систем ЭХЗ.

Влияние величины падения напряжения $E_{\text{соед пр}}$ на соединительных проводах (кабелях) в цепи постоянного тока. Протяженность соединительных проводов в цепи постоянного тока определяется геометрией площадки, на которой должна быть расположена система ЭХЗ, и возможным вредным влиянием системы катодной защиты на смежные подземные металлические сооружения. Для сокращения потерь мощности в этих условиях должна быть минимизирована протяженность проводов (кабеля). Пусть она составит l_k метров.

Выбор оптимального сечения кабеля постоянного тока обычно производят при помощи специального графика (смотри, например, справочник [4]) исходя из величины защитного тока, типа кабеля и срока службы установки электрохимической защиты или из величины максимально допустимого падения напряжения на нем, величина которого не должна превосходить 2 В. Кроме того, оптимальное сечение n кабеля, выраженное в квадратных миллиметрах, может быть определено и по следующей формуле:

$$n = I_s \sqrt{\frac{R_1 C t T}{w K_1}}, \quad (9)$$

где I_s — величина защитного тока; K_1 — стоимость одного погонного метра кабеля сечением в один квадратный миллиметр; C — стоимость одного киловатт·часа электроэнергии; w — коэффициент полезного действия преобразовате-

ля; T — срок службы установки электрохимической защиты; R_1 — сопротивление одного погонного метра кабеля сечением в один квадратный миллиметр; t — число часов в году.

Тогда общие потери мощности P_k на омическом сопротивлении кабеля при оптимизации его сечения составят

$$P_k = I_s^2 \frac{R_1}{n}. \quad (10)$$

Следовательно, при условии выбора оптимального сечения n кабеля тепловые потери на нем растут пропорционально увеличению удельного сопротивления материала кабеля и в квадратичной зависимости от роста защитного тока.

Влияние падения напряжения в электролите $E_{\text{э-т}}$. Традиционные системы электрохимической защиты характеризуются таким взаиморасположением защищаемых ПМК и анодных заземлений, при котором можно считать, что они находятся на бесконечном удалении друг от друга с точки зрения омического сопротивления между ними. Такой подход позволяет разбить $E_{\text{э-т}}$ на две части, независимые друг от друга, т. е. использовать следующую формулу:

$$E_{\text{э-т}} = E_{\text{т}} + E_{\text{а}}, \quad (11)$$

где $E_{\text{т}}$ — падение напряжения на омическом сопротивлении растекания ПМК (трубопровода), равном $R_{\text{т}}$; $E_{\text{а}}$ — падение напряжения на омическом сопротивлении растекания анодного заземления.

Тогда для общего сопротивления электролита $R_{\text{э-т}}$ можно записать следующее выражение:

$$R_{\text{э-т}} = R_{\text{т}} + R_{\text{а}}. \quad (12)$$

Отсюда непосредственно следует, что изменение величин $E_{\text{э-т}}$ и $R_{\text{э-т}}$ линейно зависит от изменений параметров как анодного заземления, так и трубопровода. Следовательно, этот анализ можно проводить порознь для каждого из этих объектов.

Начнем рассмотрение с анодного заземления. Выбор оптимального количества анодов для срока службы T анодного заземления может быть рассчитан по следующей формуле [6]:

$$n_a = I_s \sqrt{\frac{F R_0 \rho C t T}{\rho_0 w K_0}} \quad (13)$$

где F — фактор взаимовлияния анодов, определяющий увеличение сопротивления анодного

устройства в результате взаимного экранирования отдельных анодов, эта величина обычно колеблется в пределах от 1 до 2,5; t — количество часов в году, $t = 8760$ часов; T — расчетный срок эксплуатации анодного заземления (годы); ρ — удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления, которое может колебаться в очень широких пределах; C — стоимость одного киловатт/часа электроэнергии; K_0 — стоимость отдельного анода, включая его установку; w — коэффициент полезного действия преобразователя; R_0 — сопротивление растекания отдельного анода при удельном сопротивлении грунта ρ_0 , равном 10 ом \times м.

Тогда общие потери мощности P_a на омическом сопротивлении анодного заземления при оптимизации количества n_a анодов составят

$$P_k = I_s^2 \frac{R_0}{n_a} F \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (14)$$

Следовательно, при условии выбора оптимального количества анодов в анодном заземлении (n_a) тепловые потери на нем растут линейно с увеличением удельного сопротивления грунта и в квадратичной зависимости от роста защитного тока. Кроме того, они линейно зависят и от геометрии, а также от способа заложения анода, т. е. от величин R_0 и F .

Наряду с уже указанными способами оценки потерь мощности на различных элементах системы ЭХЗ, большое значение имеют мероприятия по ограничению величины защитного тока на защищаемом объекте. Сами по себе потери мощности на трубопроводе в силу больших размеров объекта обычно крайне малы. Действительно, практические измерения показывают, что при электрохимической защите в грунте общее смещение потенциала на сопротивлении растекания трубопровода, как правило, состав-

ляет 0,9 В. При этом падение напряжения на омическом сопротивлении составляет приблизительно 0,3 В, а смещение поляризационного потенциала в точке дренирования — соответственно 0,6 В. Очевидно, что в этом случае снижение потерь на всех элементах ЭХЗ может быть достигнуто путем повышения качества изоляции трубопровода и устранения его контактов с другими ПМС. Кроме того, дополнительным фактором, способствующим снижению потребления электрического тока, и в случае трубопровода служит его высокое продольное сопротивление, уменьшение которого способно существенно увеличить зону защиты трубопровода, приходящуюся на одну катодную станцию, и таким образом сократить потребление электрического тока на единицу защищаемой поверхности. При рассмотрении этого вопроса следует упомянуть значительное влияние на величину необходимого защитного тока также и поляризационного сопротивления ПМК. Однако, к сожалению, возможность его изменения при практическом осуществлении ЭХЗ, как правило, крайне мала. Следовательно, рассмотрение этого параметра в рамках данной работы, посвященной практическим вопросам снижения потерь в системе ЭХЗ, вряд ли уместно.

В статье проведен анализ и систематизация основных факторов, оказывающих влияние на потребление тока и потери мощности системой ЭХЗ при катодной защите ПМК от коррозии.

Подробно рассмотрены и систематизированы основные факторы, оказывающие влияние на потребление тока и потери мощности в цепи постоянного тока системы ЭХЗ.

Разработаны практические мероприятия по снижению потерь мощности в цепи постоянного тока системы ЭХЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.602—2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Текст] / Госстандарт.— М.: Стандартинформ, 2006.
2. ГОСТ Р 51164—98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Госстандарт России, 1998.
3. Bette, U. Taschenbuch fur den kathodischen Korrosionsschutz [Text] / U. Bette, W. Vesper.— Essen: Vulkan-Verl, 2005.— 367 S.

4. Von Baeckmann, W. Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes [Text] / W. von Baeckmann, W. Schwenk.— Verlag Chemie. 1980.— 465 S.
5. Дамаскин, Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику [Текст]: учебное пособие / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий // М.: Высшая школа, 1975.— 416 с.
6. Киселев, В.Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений [Текст] / В.Г. Киселев // Научно-технические ведомости СПб ГПУ.— 2011. № 4(135).— С. 111—116.

REFERENCES

1. **GOST 9.602–2005.** Edinaia sistema zashchity ot korrozii i starenii; Sooruzheniia podzemnye; Obshchie trebovaniia k zashchite ot korrozii [Tekst].— Moskva: Standartinform, 2006. (rus.)
2. **GOST R 51164–98.** Truboprovody stal'nye magistral'nye. Obshchie trebovaniia k zashchite ot korrozii [Tekst].— Moskva: Gosstandart Rossii, 1998. (rus.)
3. **Bette Ulrich, Vesper Wolfgang.** Taschenbuch fur den kathodischen Korrosionsschutz [Tekst].— Essen: Vulkan-Verl., 2005.— 367 S. (rus.)
4. **W. von Baeckmann, W. Schwenk.** Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes [Tekst].— Verlag Chemie, 1980.— 465 S. (rus.)
5. **Damaskin B.B., Petrii O.A.** Vvedenie v elektrokhimicheskuiu kinetiku [Tekst]: uchebnoe posobie [Tekst] // M.: Vysshaia shkola, 1975.— 416 s. (rus.)
6. **Kiselev V.G.** Osnovnye printsipy proektirovaniia katodnoi zashchity podzemnykh metallicheskikh sooruzhenii [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPb GPU.— 2011. № 4(135).— S. 111–116. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КИСЕЛЁВ Владимир Геннадьевич — доктор технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kis_vg@mail.ru

AUTHORS

KISELEV Vladimir G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kis_vg@mail.ru