

НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»



**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ
АСПЕКТЫ**

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

ВЫПУСК 4

Уфа
АЭТЕРНА
2015

УДК 00(082)
ББК 65.26
А 38

Рецензенты:

- 1. Прошин И.А., д.т.н., проф.***
- 2. Шлахов С.М., д.ф-м.н., проф.***

А 38 Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты: коллективная монография [под ред. И.А. Григорьева] . - Уфа: Аэтерна, 2015. – 88 с.

ISBN 978-5-906836-92-2

Коллективная монография «Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты» посвящена широкому кругу проблем, которые находятся в центре внимания. Монография призвана дать представление о актуальных теоретических и практических вопросах технических наук.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а так же за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Материалы публикуются в авторской редакции.

УДК 00(082)
ББК 65.26

ISBN 978-5-906836-92-2

© ООО «Аэтерна», 2015
©Коллектив авторов, 2015

Ю.А.Балакин

К.т.н., доцент

А.А.Будник

К.т.н., доцент

И.В.Соколов

К.т.н., доцент

Кафедра управления качеством инновационных наукоемких производств
Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г.Разумовского (ПКУ), Москва, Российская Федерация

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕМСЯ МЕТАЛЛЕ

Аннотация

В работе применен метод неравновесной термодинамики. Разработана оригинальная математическая модель тепломассопереноса на межфазной поверхности зародыш - расплав при внешнем воздействии (ВнВ) на затвердевающий металл. Проведен анализ выражений модели с учетом влияния структурных составляющих внешней энергии на температуру межфазной поверхности. Выполнены вычислительные эксперименты по модели, показавшие, необходимость оптимизации энергии ВнВ для получения конкретных структур литого металла и необходимого уровня свойств отливки.

Ключевые слова

Металл, тепломассоперенос, кристаллизация, внешнее воздействие, неравновесная термодинамика.

Формирование оптимальной структуры литого металла зависит от его физико - химических свойств, технологии плавки и литья. Процессы зарождения и роста твердой фазы в кристаллизующемся расплаве металла, во многом определяемые теплопереносом, в частности температурой на границе раздела фаз, существенно влияют на структуру и свойства отливок. Однако особенности теплопереноса на ранних стадиях зарождения и роста частиц твердой фазы в процессе кристаллизации металла, до настоящего времени, мало исследованы, поэтому актуальны [6,13].

Известно, что тепломассоперенос в начале кристаллизации играет важную роль в формировании структуры литого металла. Уже на начальных стадиях образования зародышей твердой фазы, посредством флуктуаций, в расплаве (системе) ощущается недостаток внутренней энергии для образования поверхности раздела жидкой и твердой фаз, т.е. для выделения из расплава частиц твердой фазы и начала устойчивой кристаллизации металла. Эту проблему часто разрешают превращением замкнутой системы в открытую. Для этого в систему вводят извне дополнительную энергию [5].

С этой целью применяют различные методы внешнего энергетического воздействия на кристаллизующийся металл. Однако получить выражение для энергии, необходимой для устойчивой кристаллизации расплава удалось пока лишь в работе [8]. Дальнейшие наши

оригинальные исследования показали возможность структурирования внешней энергии, по аналогии с энергией Гиббса для зародыша твердой фазы критической величины в расплаве металла, на поверхностную и объемную. В результате сформулирована новая гипотеза о различном механизме влияния внешней энергии на первоначальную стадию кристаллизации: зарождение частиц твердой фазы и последующую – устойчивый рост этих частиц [3].

В настоящей работе проведено оригинальное теоретическое исследование влияния внешнего воздействия (ВнВ) на теплоперенос, характеризуемый изменением температуры на границе: частица твердой фазы – расплав металла при его кристаллизации. Для решения этой задачи уже недостаточно методик классической равновесной термодинамики, т.к. реальный процесс кристаллизации металлов и сплавов проходит неравновесно [3,4].

В этой связи, в работе применен один из феноменологических методов неравновесной термодинамики, заключающийся в следующем [14]:

Записывают условия равновесия системы в виде равенства нулю некоторой функции:

$$\varphi^0(\alpha_i^0; X_i) = 0, (1)$$

где α_i^0 – значение параметра состояния системы α_i в состоянии равновесия; X_i – обобщенная сила, в частности, функция от термодинамического потенциала системы. Тогда вблизи равновесного состояния, когда $\alpha_i \neq \alpha_i^0$ имеет место равенство:

$$\partial\alpha_i / \partial t = \omega \varphi(\alpha_i; X_i), (2)$$

где t – время; ω – коэффициент пропорциональности, между $\partial\alpha_i / \partial t$ – производной по времени от параметра состояния системы в неравновесных условиях и $\varphi(\alpha_i; X_i)$ – функция этого параметра и обобщенной силы вблизи равновесия.

Выражение (2) является исходным для разработки математической модели влияния ВнВ на температуру поверхности частицы твердой фазы, растущей в неравновесно кристаллизующемся расплаве.

Запишем условие равновесия приращения энергии Гиббса для системы, состоящей из некоторого объема расплава при его кристаллизации в зародыш сферической формы (ΔG_i) в виде:

$$\Delta G_i = \Delta G_{vi} + \Delta G_{si} = 0, (3)$$

где ΔG_{vi} и ΔG_{si} – соответственно объемная и поверхностная составляющая этой энергии. Это справедливо для изотермической кристаллизации, когда

$T_{кр} = T_0$, т.е. температура кристаллизации ($T_{кр}$) соответствует равновесной (T_0).

В реальных условиях кристаллизации $T_{кр} \neq T_0$ и равенство (3) отлично от нуля, тогда следует применить уже метод термодинамики необратимых процессов и выражение (2) видоизменить применительно к описанию температуры на поверхности частицы твердой фазы (T), растущей в неравновесно кристаллизующемся расплаве, т. е.

$$\partial T_i / \partial t = \omega_0 \varphi(T_i; X_i), (4)$$

где ω_0 – коэффициент пропорциональности; $\varphi(T_i; x_i)$ – функция, зависящая от температуры и обобщенной силы.

Например, $\varphi = \varphi(\Delta G_T + \Delta G_e)$,

где – под знаком функции φ стоит сумма приращений энергии Гиббса, характеризующей указанные выше параметры процессов внутри системы ΔG_i и энергии ВнВ ΔG_e , необходимой системе для устойчивого зарождения и роста зародыша твердой фазы в

расплаве металла. Для зародыша температура и энергия являются еще и функциями его внешних параметров [2], т.е. размера (r), поэтому выражение (4) следует переписать в виде,

$$(\partial T_i / \partial r_i) \cdot (\partial r_i / \partial t) = \omega_0 \varphi_i(r_i; x_i; T_i), \text{ или (5)}$$

$$\partial T_i / \partial r_i = (\omega_0 / C) \cdot \varphi_i(r_i; x_i; T_i), \text{ (6)}$$

где $C = \partial r_i / \partial t$ – линейная скорость роста частицы твердой фазы, тогда коэффициент (ω_0) с учетом физики явления и его размерности можно выразить равенством:

$$\omega_0 = T / (D\rho V), \text{ (7)}$$

где D – коэффициент диффузии в расплаве, $\text{м}^2 / \text{с}$; ρ и V – плотность и объем твердой фазы соответственно, $\text{кг} / \text{м}^3$ и м^3 . Величину объема твердой фазы можно представить в виде произведения:

$$V = V_3 \cdot N_3, \text{ (8)}$$

где $V_3 = (4 / 3) \pi r^3$ – объем сферического зародыша, N_3 – число зародышей.

Функцию $\varphi_i(r_i; x_i; T_i)$ можно выразить как сумму энергий Гиббса, но с учетом энергетического коэффициента (a), равного отношению энергий ВнВ и энергии Гиббса, необходимой системе для устойчивого роста зародыша твердой фазы в расплаве металла, тогда получим функцию вида:

$$\varphi_i(r_i; x_i; T_i) = 4\pi\sigma^2 - (4 / 3)\pi r_k^3 (L\Delta T / T_0) + (2\pi\sigma r_k^2 - \pi r_k^2 r (L\Delta T / T_0)a), \text{ (9)}$$

где r_k – критический размер равновесного зародыша твердой фазы, м ; σ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкой и твердой фаз, $\text{Дж} / \text{м}^2$; L – удельная теплота кристаллизации, $\text{Дж} / \text{м}^3$; ΔT и T_0 – соответственно переохладение и температура кристаллизации металла, К .

Тогда уравнение (6) с учетом (7,8 и 9) и упрощений примет вид:

$$\partial T / \partial r = T / (CD\rho N_3) [3\sigma / r + 3 / 2(r_k^2 / r^3)\sigma a - (L\Delta T / T_0) - 3 / 4(r_k^2 / r^2)(L\Delta T / T_0)a], \text{ (10)}$$

Это выражение обобщенной математической модели, описывающей изменения температурного градиента поверхности частицы твердой фазы, растущей в объеме расплава, при ВнВ на кристаллизацию металла. После интегрирования дифференциального уравнения модели при начальных условиях: $r = r_k$, $T = T_0$, $a = 0$ и упрощений получено общее решение модели:

$$T = T_0 \exp \{ b [3\sigma (\ln |r / r_k| - (1 / 4) (r_k / r)^2 a) + (L\Delta T / (4T_0)) r_k (4 - 4(r / r_k) + 3(r_k / r)a) \}, \text{ (11)}$$

где $b = 1 / (CD\rho N_3)$ – коэффициент, зависящий от линейной скорости роста C , коэффициента диффузии в расплаве, плотности и числа зародышей твердой фазы.

Таким образом, температура на поверхности частицы твердой фазы экспоненциально зависит от равновесной температуры кристаллизации, причем в показателе экспоненты, влияя на его знак, конкурируют: «поверхностный» член, являющийся множителем при поверхностном натяжении σ и «объемный» член – множитель при переохладении ΔT . В свою очередь эти члены оба зависят сложным образом от отношения « r / r_k » и обратного ему, т.е. от соотношения размеров частицы, кристаллизующейся в неравновесных и равновесных условиях.

При росте частицы в процессе кристаллизации эти соотношения будут постоянно меняться, что изменит температуру на поверхности частицы твердой фазы. Внешняя энергия также влияет на теплоперенос на границе раздела фаз.

Энергетический коэффициент « a » входит как в «поверхностный», так и в «объемный» члены. Вероятно, энергия ВнВ, перераспределяясь между энергией, идущей на образование

поверхности твердой фазы и переохлаждение объема расплава металла, будет сложным образом влиять на температуру поверхности частицы твердой фазы на различных стадиях её кристаллизации.

Необходимо отметить, что полученная математическая модель является обобщенной, т.к. включает, как частный случай, изотермическую кристаллизацию. Действительно, при $g = g_k$, $a = 0$ из выражения (11) следует

$$T = T_0, \quad (12)$$

т.е. температура на поверхности растущего зародыша постоянна и равна равновесной.

Если в выражении (11) положить, что ВнВ отсутствует, то $a=0$ и получаем случай кристаллизации (спокойной) без ВнВ:

$$T_c = T_0 \exp \{ b [3\sigma \ln |g / r_k| + (L\Delta T / T_0) r_k (1 - g / r_k)] \}, \quad (13)$$

где T_c – температура на поверхности зародыша при спокойной кристаллизации без ВнВ.

Таким образом, на основе феноменологического метода термодинамики необратимых процессов получено выражение для температуры на поверхности частицы твердой фазы при ее неравновесной кристаллизации без ВнВ на различных стадиях роста этой частицы в расплаве металла.

Полученная математическая модель объединяет характеристики процессов массо - и теплопереноса, происходящего на поверхности, растущей в кристаллизующемся расплаве частицы твердой фазы. Известно, что размер частицы и скорость ее роста, определяемые диффузией из жидкого расплава, можно связать с массой частицы и коэффициентом диффузии в жидком расплаве. Температура, как мера интенсивности теплового движения на поверхности зародыша, также связана с размером, скоростью роста и энергией частицы. Таким образом, возможно объединить в одной математической модели характеристики тепломассопереноса на поверхности растущей в расплаве частицы твердой фазы.

Рассмотрим более подробно частное решение уравнения математической модели при отсутствии ВнВ на процесс кристаллизации металла. Такое решение соответствует выражению (13), которое можно упростить с учетом величины критического размера частицы твердой фазы:

$$r_k = 2\sigma T_0 / (L\Delta T), \quad (14)$$

и представить в следующем виде

$$T_c = T_0 \exp \{ b [3\sigma \ln |g / r_k| + 2\sigma (1 - g / r_k)] \}, \quad (15)$$

Здесь оба слагаемых в показателе экспоненты зависят от поверхностного натяжения на границе раздела фаз «с» и отношения размеров сферической частицы твердой фазы, кристаллизующейся в неравновесных и равновесных условиях « g / r_k ».

Первое слагаемое на начальной стадии кристаллизации при $g < r_k$, отрицательно, а второе положительно, т.е. первый член способствует снижению температуры, а второй ее повышению и общий знак их суммы определится в ходе их «конкуренции» при суммировании.

Необходимо отметить, что при приближении « g » к « r_k », т.е. к окончанию начальной стадии кристаллизации (появлению зародышей твердой фазы в расплаве) оба слагаемых стремятся к нулю, но первое, оставаясь отрицательным, а второе положительным, тогда температура на поверхности частицы твердой фазы будет приближаться к равновесной ($T \rightarrow T_0$).

На второй стадии кристаллизации, характеризующейся устойчивым ростом частиц твердой фазы в расплаве, когда $\langle r \rangle$ превышает $\langle r_c \rangle$, знаки слагаемых в показателе экспоненты меняются на противоположные по сравнению с первой стадией кристаллизации: первое становится положительным, а второе отрицательным. По мере нарастания размера частицы твердой фазы последнее слагаемое в выражении (15) будет расти по модулю быстрее, чем первое, увеличение которого несколько нивелируется логарифмом и, очевидно, их сумма будет иметь знак минус и уменьшаться, а температура частицы будет снижаться.

В результате этого анализа можно предположить следующий механизм влияния указанных слагаемых на процесс зарождения устойчивой к росту частицы твердой фазы на начальной стадии спокойной кристаллизации.

Оба слагаемых «работают» на стабилизацию зародившейся частицы, влияя на температуру поверхности этой частицы следующим образом: первое – снижая температуру и увеличивая, таким образом, переохлаждение расплава (локальной его области), что способствует возникновению тепловой флуктуации и в результате зарождению частицы твердой фазы; второе – напротив, повышая температуру на поверхности этого зародыша, интенсифицируя, таким образом, процессы диффузионного роста (внутренней диффузии) и способствуя устойчивому росту частицы твердой фазы. По мере ее роста и приближения температуры к «выражению (12)» уменьшается необходимость в такой «энергетической подпитке» зародыша [3].

При переходе ко второй стадии кристаллизации, где преимущественно идет рост частиц твердой фазы можно предположить следующий механизм влияния указанных слагаемых: первое – становится положительным и продолжает ускорять диффузионные процессы (внутренней диффузии) способствуя уплотнению и росту частиц, зарождающихся и на второй стадии; второе – отрицательно и способствует стабильному зарождению (появлению тепловой флуктуации) частиц и на второй стадии, а также росту частиц с размером больше критического равновесного по нормальному и дислокационному механизмам, увеличивая переохлаждение расплава. По мере роста частиц второе слагаемое и будет преобладать над первым и так до затвердевания металла.

Проведем анализ неравновесной кристаллизации с ВнВ на затвердевающий металл. С этой целью рассмотрим варианты общих решений уравнения модели при различных значениях энергетического коэффициента «а». Для упрощения этих выражений преобразуем частное решение (15) к виду:

$$T_c = T_0 \exp(b(3\sigma\alpha + 2\sigma\beta)), \quad (16)$$

где $\alpha = \ln|r/r_c|$; $\beta = (1-r/r_c)$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от отношения размера сферической частицы твердой фазы, растущей в неравновесных и равновесных условиях.

Тогда общие решения уравнения модели при различных значениях коэффициента «а», т.е. варьируемой величине энергии ВнВ, можно преобразовать из (11) с учетом (16) и объединить в таблицу 1.

Рассмотрение информации, обобщенной в таблице 1, позволяет определить влияние энергии ВнВ на температуру поверхности частицы твердой фазы, растущей в кристаллизующемся расплаве.

Энергия ВнВ перераспределяется между двумя слагаемыми показателя экспоненты, оказывая влияние на каждое из них и на сумму этих слагаемых.

На первой стадии кристаллизации, где преимущественно идет зарождение частиц твердой фазы и размер этих образований «г» меньше критического «г_к» первое слагаемое отрицательно, а второе положительно. Энергия ВнВ

Таблица 1 - Формулы общего решения модели при различных энергиях ВнВ

Величина коэффициента «а»	Вид формулы общего решения модели	Номер формулы
0	$T_c = T_0 \exp \{b [3\sigma\alpha + 2\sigma\beta]\}$	(16)
0,5	$T = T_0 \exp \{b [3\sigma(\alpha - 1 / 8(r_k / r)^2) + 2\sigma(\beta + 3 / 8(r_k / r))]\}$	(17)
1,0	$T = T_0 \exp \{b [3\sigma(\alpha - 1 / 4(r_k / r)^2) + 2\sigma(\beta + 3 / 4(r_k / r))]\}$	(18)
1,5	$T = T_0 \exp \{b [3\sigma(\alpha - 3 / 8(r_k / r)^2) + 2\sigma(\beta + 9 / 8(r_k / r))]\}$	(19)
2,0	$T = T_0 \exp \{b [3\sigma(\alpha - 1 / 2(r_k / r)^2) + 2\sigma(\beta + 3 / 2(r_k / r))]\}$	(20)

Примечание: выражение (16) приведено повторно для удобства анализа табличных данных.

усиливает отрицательность первого и увеличивает второе слагаемое, тем больше, чем сильнее оказывается ВнВ на кристаллизующийся металл. Знак суммы слагаемых определить можно при конкретных расчетах, сейчас же заметим, что он определится как бы «конкуренцией» этих слагаемых.

Необходимо отметить, что особенно сильно влияет энергия ВнВ на частицы с размером значительно меньшим, чем критический равновесный радиус ($r \ll r_k$), причем превалирует внешнее воздействие на первое слагаемое, т.к. отношение r / r_k в квадрате.

При увеличении размера частицы твердой фазы до критического, к окончанию первой стадии кристаллизации влияние ВнВ становится меньше, а температура на поверхности частицы твердой фазы будет приближаться к равновесной ($T \rightarrow T_0$).

На второй стадии кристаллизации, когда размер частицы превышает критический равновесный $r \geq r_k$ знак первого слагаемого зависит от соотношения величины α и $(r_k / r)^2$, аналогично для второго слагаемого, знак которого зависит от соотношения β и (r_k / r) . Конкретный знак слагаемых и суммы, т.е. всего показателя экспоненты может быть определен в ходе вычислительного эксперимента по модели.

Здесь же заметим, что если знаки коэффициентов α и β изменятся на противоположные: первое станет положительным, а второе – отрицательным, то члены, характеризующие ВнВ, будут несколько ослаблять как α , так и β , таким образом, как бы продляя первую стадию кристаллизации.

По мере увеличения размера частицы твердой фазы, особенно когда $r \gg r_k$ влияние ВнВ на рост частиц будет ослабевать, т.е. подтверждается вывод многих авторов об эффективности ВнВ особенно на начальной стадии кристаллизации [1, 13].

В результате можно выдвинуть следующую гипотезу о механизме влияния ВнВ на процесс зарождения устойчивых к росту частиц твердой фазы на начальной стадии кристаллизации.

ВнВ приводит к более значительному переохлаждению локальной области расплава, способствуя возникновению тепловой флуктуации и, в результате, зарождению частицы твердой фазы более устойчивой к росту, чем при кристаллизации без воздействия.

Кроме того, энергия ВнВ сильнее повышает температуру на поверхности этого зародыша, чем при спокойной кристаллизации, интенсифицируя процессы диффузионного роста (внутренней диффузии в пористое тело зародыша) и, таким образом, выравнивая состав, способствуя структурной однородности растущей частицы твердой фазы.

По мере роста и укрупнения частицы до размера критического равновесного « r_k » уменьшается необходимость в такой «энергетической подпитке» зародыша. Особенно, если энергетический коэффициент превышает единицу, когда практически зародыш любой величины становится способным к устойчивому росту. В этом случае, вероятно, повышение температуры поверхности частицы до равновесной и даже некоторый перегрев расплава. Кристаллизация будет проходить при температуре на поверхности частицы превышающей равновесную. Этот перегрев способствует ускорению процессов диффузионного роста (внутренней диффузии) и замедлению других механизмов роста (нормального и дислокационного), стабилизируя химический состав и форму частицы как сферическую, уменьшая ее искажения.

При переходе ко второй стадии кристаллизации, где преимущественно идет рост частиц твердой фазы с размером больше критического равновесного можно предположить следующий механизм влияния ВнВ на температуру поверхности частицы твердой фазы, растущий в кристаллизующемся расплаве.

Анализ слагаемых показателя экспоненты затруднен его многочленностью и «конкуренцией» уже не двух, а четырех составляющих в этих слагаемых.

К коэффициентам « α » и « β » при спокойной кристаллизации добавляются члены, характеризующие ВнВ, однако, некоторые тенденции можно выявить и теоретическим анализом выражений (17, 18, 19, 20) в сравнении с (16).

ВнВ нивелирует значение коэффициентов α и β , т.е. их влияние на температуру на поверхности зародыша. И, таким образом, как бы удлиняет первую стадию кристаллизации, чтобы завершить формирование частиц устойчивых к росту в кристаллизующемся расплаве, продолжая стабилизировать их состав и уменьшая искажение формы частицы.

Однако, при укрупнении частиц до величины, значительно превышающей критический равновесный ($r \gg r_k$), влияние ВнВ на снижение температуры поверхности расплава уменьшается и начинает превалировать тенденция повышения температуры поверхности частицы твердой фазы. Это способствует снижению переохлаждения расплава и, вероятно, более полному прохождению диффузионных процессов по механизму внутренней диффузии и замедлению нормального и дислокационного роста частицы. Таким образом, происходит фиксация однородного химического состава частицы и уменьшается возможность роста кристалликов твердой фазы дендритной формы.

Представляет интерес провести вычислительные эксперименты по разработанной модели с целью анализа изменения температурного градиента и формулировки механизма влияния ВнВ на тепломассоперенос при кристаллизации металлов.

Необходимо отметить, что анализ формул (16 – 20), выполнен без учета влияния величины коэффициента «b» в выражениях модели.

Влияние этого фактора на температуру поверхности частицы твердой фазы было выявлено путем вычислительных экспериментов по модели при различных ВнВ на кристаллизующийся расплав, которые проведены по выражениям общих решений модели для чистого железа. Физико - химические свойства железа приведены по данным [1,11] в таблице 2.

Таблица 2 - Физические характеристики чистого железа

№ п / п	Параметры	Источники
1	Температура плавления, T_0 , К, 1812	[1,11]
2	Межфазное поверхностное натяжение, σ , Дж / м ² , 0,204	[1]
3	Диффузионный коэффициент, D, м ² / с, $1 \cdot 10^{-9}$	[1,11]
4	Плотность, ρ , кг / м ³ , $7,87 \cdot 10^3$	[1]

Величину коэффициента «b», содержащуюся в выражениях модели рассчитывали по формуле, взятой из первой части данной статьи:

$$b = 1 / (CD\rho N_3), (21).$$

где C – линейная скорость роста частицы, D – коэффициент диффузии в расплаве, ρ – плотность расплава и N_3 – число зародышей твердой фазы в заданном объеме твердой фазы.

Линейную скорость роста рассчитывали по выражениям, меняющимся в зависимости соотношения размера частицы твердой фазы, растущей в неравновесных и равновесных условиях (r / r_k) и наличия ВнВ [3]. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Формулы для расчета
линейной скорости роста частицы твердой фазы
в кристаллизующемся расплаве

Отношение r / r_k	Расчетные формулы	
	Без воздействия	С внешним воздействием
$0 < r < r_k$	$C = \partial r / \partial t = 2 \sqrt{\pi D} \cdot (1 / \sqrt{t})$	
$r \approx 1,2 r_k$	$2\pi D / r$	$C + 8\pi D(a-1) / r_k$
$r \gg r_k$	$C + (\pi D / r_k) + (6(\pi D)^{3/2} / r_k^2) \cdot \sqrt{t}$	$C + 8\pi D(a-1) / r_k + (12(\pi D)^{3/2} \times (a-1)^2 / r_k^2) \cdot \sqrt{t}$

Время соответствующих стадий кристаллизации рассчитывали по формулам из [3,4] и объединенным в таблицу 4.

Таблица 4 - Формулы для расчета продолжительности стадий роста частицы

Отношение r / r_k	Расчетная формула, t, с	
	Без воздействия	С внешним воздействием
$0 < r < r_k$	$(r_k^2 / (16\pi D)) (r / r_k)$	
$r \approx 1,2 r_k$	$(r^2 - 4 r_k^2) / (16\pi D)$	
$r \gg r_k$	$(r_k / (2\pi D)) ((r - 2 r_k)^2 r_k / 2)^{3/2}$	$(r_k^2 / (4\pi D (a - 1))) \times ((r / r_k)^2 / (a - 1))^{1/3}$

Примечание: при значении $(a = 1)$ расчет времени проводили по формуле для предыдущей стадии.

Число зародышей твердой фазы проводили приближенно, считая $N3 \sim n$, где n - скорость зарождения зародышей в единице объема за время соответствующей стадии кристаллизации, рассчитанное по формулам из таблицы 3. Объем фиксировали величиной $0,1 \text{ м}^3$ во всех расчетах.

Результаты расчетов коэффициента «b» по формуле (21) приведены в таблице 5. Расчеты проводили в зависимости от стадии кристаллизации и величины энергетического коэффициента «a».

Таблица 5 - Результаты расчетов коэффициента «b» в выражениях для температуры поверхности частицы твердой фазы

№ п. / п	Отношение r / r_k	Величина энергетического коэффициента «a»				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
1	0,13	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$
2	0,37	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$
3	0,78	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$
4	1,26	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$
5	2,72	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$0,92 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$5,52 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$
6	4,50	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$19,55 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$10,59 \cdot 10^{-3}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$
7	7,38	$3,18 \cdot 10^{-3}$	$22,58 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$13,55 \cdot 10^{-3}$	$0,86 \cdot 10^{-3}$

Итоги расчетов величин и знаков поверхностного члена – «S», объемного – «V» и их суммы – « Σ » в выражениях модели, которые даны как числовые множители при поверхностном натяжении на границе раздела фаз – σ , объединены в таблице 6.

Расчетные значения температуры на поверхности частицы твердой фазы в зависимости от стадии кристаллизации и величины энергии ВнВ по выражениям модели приведены в таблице 7. Для наглядности табличные данные проиллюстрированы графиками $T = f(a, r / r_k)$ на рисунке 1.

Рассмотрение результатов модельных вычислительных экспериментов проведено с использованием графиков, показывающих изменение температуры частицы твердой фазы железа, кристаллизующегося в неравновесных и равновесных условиях (рис.1), а также данных таблиц 2 - 6.

Таблица 6 - Влияние величины энергетического коэффициента «а» ВнВ на знак и величину членов выражений (16 - 20):
поверхностного – «S»; объемного – «V» и их суммы «Σ»

№ п. / п	Отно - шение г / г _к	Величина энергетического коэффициента «а»					
		0			0,5		
		«S»	«V»	«Σ»	«S»	«V»	«Σ»
1	0,13	- 6,0	+1,7	- 4,3	- 26,0	+7,0	- 19,0
2	0,37	- 3,0	+1,3	- 1,7	- 5,8	+3,3	- 2,5
3	0,78	- 0,7	+0,4	- 0,3	- 1,4	+1,4	0
4	1,26	+0,7	- 0,5	+0,2	+0,73	- 0,03	+0,7
5	2,72	+3,0	- 3,4	- 0,4	+3,0	- 3,2	- 0,2
6	4,50	+4,5	- 7,0	- 1,5	+4,5	- 7,0	- 2,5
7	7,38	+6,0	- 12,8	- 6,8	+6,0	- 12,5	- 6,5
№ п. / п	Отно - шение г / г _к	Величина энергетического коэффициента «а»					
		1,0			1,5		
8	0,13	- 41,0	+14,7	- 26,3	- 66,0	+18,0	- 48,0
	0,37	- 8,3	+5,3	- 3,0	- 11,1	+7,1	- 4,0
9	0,78	- 1,3	+2,3	+1,0	- 2,6	+3,4	+0,8
10	1,26	+0,3	+0,5	+0,8	+0,05	+1,25	+1,3
11	2,72	+3,0	- 2,8	+0,2	+3,0	- 3,3	- 0,3
12	4,50	+4,5	- 6,5	- 2,0	+4,5	- 6,5	- 2,0
13	7,38	+6,0	- 12,0	- 6,0	+6,0	- 12,5	- 6,5

Прежде всего, необходимо отметить то, что внешний вид графиков на рис.1 удивительно похож на температурные кривые кристаллизации малоуглеродистой стали, в тиглях разного диаметра, приведенные в работе

Таблица 7 - Изменение температуры частицы твердой фазы железа

№ п / п	Энергети- ческий коэффи- циент «а»	Стадии процесса кристаллизации						
		1				2		
		Отношение размеров частицы г / г _к						
		0,13	0,37	0,78	1,26	2,72	4,5	7,3
1	0	1811,5	1811,9	<1812	>1812	1811,6	1810,0	1804,0
2	0,5	1810,0	1811,8	1812,0	1813,0	1811,3	1794,0	1760,0

3	1,0	1809,0	1811,8	1812,2	1812,0	1810,0	1809,0	1803,0
4	1,5	1756,0	1811,7	1812,1	1811,1	1810,4	1804,0	1780,0
5	2,0	1741,0	1811,8	1812,2	1812,2	1812,0	1811,5	1810,0

Гуляева Б.Б. [9] (см. кривую 7 рис.1). Вначале переохлаждение расплава, затем уменьшение его практически до нуля и достижение равновесной температуры кристаллизации T_0 и, наконец, после определенного времени снова увеличение переохлаждения, т.е. снижение температуры.

Такая аналогия расчетных и литературных данных показывает достоверность разработанной модели, а также на возможность распространения выводов из анализа модели не только на кристаллизацию не только металлов, но и сплавов.

Анализ табличных данных и графиков практически подтверждает изложенный выше механизм влияния ВВ на температуру поверхности частицы твердой фазы, растущей в кристаллизующемся расплаве металла. Однако, необходимы некоторые замечания и уточнения, опираясь на расчетные данные.

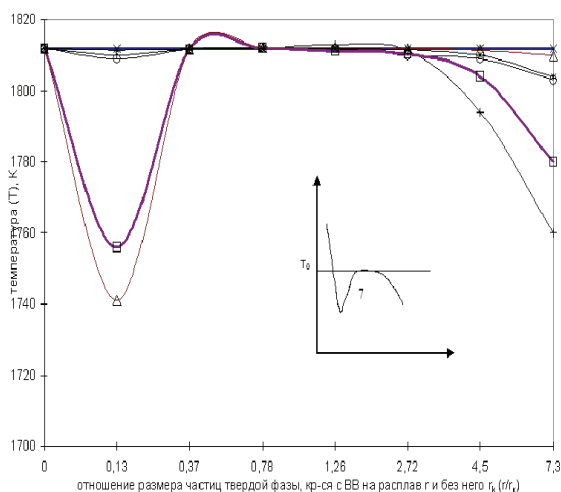


Рисунок 1. Изменение температуры частицы твердой фазы железа

- ×— Кривая 1: равновесная кристаллизация
- ★— Кривая 2: неравновесная кристаллизация без ВВ ($a=0$)
- |— Кривая 3: кристаллизация с ВВ ($a=0,5$)
- Кривая 4: кристаллизация с ВВ ($a=1,0$)
- Кривая 5: кристаллизация с ВВ ($a=1,5$)
- △— Кривая 6: кристаллизация с ВВ ($a=2,0$)
- Кривая 7: из [9]

В частности, при неравновесной кристаллизации без ВнВ (см. кривую 2 на рис.1) температура поверхности частицы практически постоянна до величины « τ » соответствующего « τ_c », а затем начинает убывать, т.е. вероятность зарождения твердой фазы повышается только после достижения размера частицы критического равновесного, что соответствует известным теоретическим выводам Фольмера М. [15].

Однако зародыш является малым объектом, для которого большое значение имеют флуктуации параметров состояния системы. Термодинамика описывает поведение зародыша «в среднем». Это означает, что вероятность прямого перехода меньше вероятности обратного, но прямой переход при этом не исключается [7,10].

Это положение термодинамики также подтверждается расчетами по нашей модели. На рис.1 и в табл.6 замечаем, что при начальной стадии кристаллизации без ВнВ возможны тепловые флуктуации, например, при отношении $\tau / \tau_c \approx 0,13$ возникает переохлаждение $\Delta T \approx 0,5K$ и, вероятно образуются зародыши твердой фазы, но устойчивый их рост энергетически маловероятен.

Применяя ВнВ на расплав в процессе кристаллизации, возможно, увеличить эту вероятность устойчивого образования и роста частицы твердой фазы с размером меньше критического равновесного, а при величине энергетического коэффициента « a » более единицы сделать практически любой зародыш устойчивым к росту, т.е. сделать это событие из вероятного достоверным.

Анализ температурных кривых подтверждает сказанное выше. С увеличением энергии ВнВ на начальной стадии кристаллизации происходит резкое уменьшение температуры на поверхности образующейся частицы (см. кривые 4, 5, 6). Например, при величине энергетического коэффициента $a = 1$, получено $\Delta T \approx 3K$, при увеличении « a » до двух ΔT растет до $71K$, т.е. расплав в локальной области вокруг зародыша переохлаждается весьма значительно, очевидно, в результате усиления тепловой флуктуации в процессе диссипации энергии ВнВ, вводимой в расплав.

При росте частицы твердой фазы до размера критического равновесного $\tau \approx \tau_c$ происходит уменьшение переохлаждения и повышение поверхностной температуры частицы, вероятно, за счет выделения теплоты кристаллизации. В результате устанавливается температура, близкая к равновесной $T \rightarrow T_0$.

При увеличении энергии ВнВ расчеты фиксируют небольшой перегрев поверхности частицы выше T_0 на $0,1; 0,2K$, который можно также объяснить некоторым избытком теплоты кристаллизации за счет энергии ВнВ, преобразующейся в тепловую, по сравнению с кристаллизацией без воздействия.

На второй стадии кристаллизации, когда размер частицы превышает критический равновесный $\tau > \tau_c$ происходит снижение температуры на поверхности кристаллика, т.е. увеличение переохлаждения расплава. Однако ход температурных кривых при общей тенденции к снижению имеет при различных энергиях воздействия некоторые особенности.

Величина энергетического коэффициента неоднозначно влияет на степень снижения температуры поверхности частицы твердой фазы.

Наиболее сильно охлаждается поверхность частицы при значении $a=0,5$, например, при $\tau / \tau_c \approx 4,5$ фиксируется расчетами $\Delta T \approx 18K$, а при $\tau / \tau_c \approx 7,3$ переохлаждение возрастает до $52K$. Явная линейность температурной кривой на этом участке свидетельствует о росте твердой

фазы по нормальному и дислокационному механизму, когда скорость нарастания кристаллика пропорциональна переохлаждению. Рассматривая формулы таблицы 3 для линейной скорости роста частицы твердой фазы в кристаллизующемся расплаве при $\tau \gg \tau_k$ и ВнВ легко заменить, что составляющая скорости нормального роста при $a=0,5$ будет отрицательна, а скорости дислокационного роста положительна. В результате их суммирования общая скорость роста снизится, что отражается на величине коэффициента «b» (см. табл. 4), который увеличивается и усиливает влияние на понижение температуры (через показатель экспоненты).

С увеличением энергии ВнВ в два раза ($a=1,0$) происходит практически полная «компенсация» внутренних энергетических потребностей системы на образование и устойчивый рост частиц твердой фазы.

В результате кривая 4 (см. рис.1) приближается к температурной кривой неравновесной кристаллизации без воздействия (кривая 2). Однако охлаждение идет несколько быстрее, чем при спокойной кристаллизации.

Анализ данных табл.3 указывает, что при $a=1,0$ и $\tau \gg \tau_k$ скорость роста частиц твердой фазы будет меньше, чем при спокойной кристаллизации из-за отсутствия составляющих нормального и дислокационного механизмов, т.е. будет происходить рост глобулярных частиц твердой фазы в отличие от дендритов при спокойной кристаллизации.

Аналогичная картина будет происходить и при $a = 2,0$ кривая 6 (см. рис.1). Но снижение температуры будет происходить медленнее, чем даже при спокойной кристаллизации, появляются составляющие нормального и дислокационного роста (см. табл.2) и результирующая скорость значительно больше, чем в предыдущем случае. Однако увеличение скорости роста компенсируется энергетическим фактором и практически не влияет на температуру поверхности частицы. Энергия ВнВ, преобразуясь в тепловую, при избытке потребностей системы начинает нагревать расплав металла, снижая темп его охлаждения. Вероятно, дальше увеличивать вводимую в расплав энергию извне нецелесообразно, т.к. она будет еще сильнее прогревать расплав и практически может противодействовать кристаллизации металла.

При значении энергетического коэффициента, $a=1,5$ (см. кривая 5 на рис.1) температура поверхности зародыша убывает более значительно, чем при $a=1,0$ (кривая 4), но слабее, чем при $a=0,5$ (кривая 3). Величина переохлаждения в зависимости от отношения « τ / τ_k » увеличивается уже нелинейно. Это подтверждается видом формул в табл. 2, т.к. по сравнению с ростом частиц при $a=1,0$ включаются (при увеличении этого коэффициента до 1,5) нормальный и дислокационный механизмы роста твердой фазы.

Однако такое увеличение скорости роста будет частично компенсироваться небольшим избытком энергии ВнВ ($a>1$) и суммарное влияние этих факторов приведет по сравнению с кривой 3 при $a=0,5$ к превалированию «энергетического» фактора (увеличился втрое до $a=1,5$) над «поверхностным», приводящим к углублению переохлаждения. В результате кривая 5 проходит выше кривой 3.

Таким образом, для получения конкретных структур и, следовательно, свойств литого металла нужно оптимизировать энергию ВнВ на кристаллизующийся расплав в интервале значений энергетического коэффициента $0 < a < 2$.

Анализ температурного градиента ($\partial T / \partial r$) проводили по иллюстрации данных таблицы 6 на рис.1. Значения ($\partial T / \partial r$) определяются величиной и знаком тангенса угла наклона

касательной к точкам температурной кривой с положительным направлением горизонтальной оси « t / $^{\circ}\text{C}$ ».

Можно выявить общую закономерность изменения температурного градиента при неравновесной кристаллизации без ВнВ (см. кривую 2). На первой стадии $\partial T / \partial r = 0$ и начало устойчивой кристаллизации маловероятно, лишь только после достижения частиц размера критического равновесного радиуса градиент температуры становится отрицательным и начинается устойчивый процесс кристаллизации.

ВнВ изменяет температурный градиент на поверхности частиц твердой фазы особенно на первой стадии кристаллизации, где происходит процесс зарождения твердой фазы.

При $r \ll r_k$ в расплаве происходит, под действием внешней энергии, формирование тепловых флуктуаций, образуются локальные области с порядком атомов близким к дальнему, характерному для твердой фазы. Из них образуются «горячие» образования – дозародыши кристаллизации. При этом температурный градиент их резко отрицателен, а поскольку он направлен всегда, по образному выражению Зельдовича Я.Б. [12] «к печке» (см. рис.2), т.е. к дозародышу, как показано на рис. 2 – стрелками.

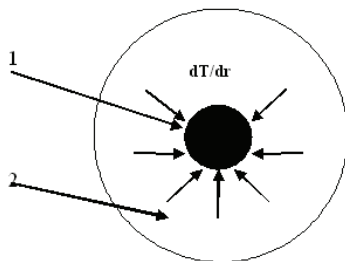


Рисунок 2. Схема температурного поля ($\partial T / \partial r < 0$) дозародыша в локальной области расплава ($r < r_k$)

1 – дозародыш; 2 – локальная область расплава

Действительно, эти частицы могут стать, а при ВнВ становятся устойчивыми и выделяются из расплава как центры роста твердой фазы. На их весьма развитую поверхность диффундируют из расплава атомы металла, вероятно, по механизму внутренней диффузии в пористое тело дозародыша, уплотняя и наращивая его до величины зародыша, способного к росту, т.е. критического неравновесного для данной величины энергии ВнВ.

При достижении зародышем размера критического неравновесного радиуса твердой фазы температурный градиент уменьшается до нуля и затем становится положительным. Частица, сформировавшаяся в зародыш, начинает устойчиво расти, т.е. изменяется направление теплоотдачи. Тепло от «горячего» дозародыша, перешедшего потенциальный барьер, отдается в окружающий его переохлажденный расплав, что схематично показано на рис.3.

Эта фаза кристаллизации традиционной, когда частица твердой фазы устойчиво растет с выделением в локальной области расплава теплоты кристаллизации, которое «аккумулирует» расплав и его переохлаждение начинает снижаться.

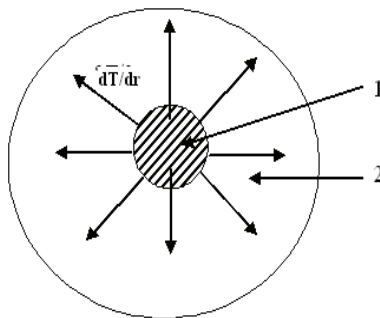


Рисунок 3. Схема температурного поля ($\partial T / \partial r > 0$) зародыша, способного к росту, в локальной области расплава ($r \leq r_k$)
1 – зародыш, устойчивый к росту; 2 - локальная область расплава

При увеличении размера частицы до величины критического равновесного радиуса температурный градиент снова становится практически равным нулю и устанавливается тепловое равновесие между твердой фазой и расплавом. Однако рост твердой фазы продолжается как по механизму внутренней диффузии, так и внешней диффузии уже на поверхности достаточно крупной сферической формы частицы.

На второй стадии кристаллизации температурный градиент становится снова отрицательным, но в значительно меньшей степени, чем в начале кристаллизации. Это происходит из-за формирования зародышей твердой фазы в оставшемся объеме расплава. Их число в меньшем объеме жидкого металла значительно меньше, чем на первой стадии кристаллизации, поэтому и величина температурного градиента уменьшается.

При ВнВ с различной величиной энергетического коэффициента температурный градиент изменяется по-разному.

Если, $a=1,0$, то энергия ВнВ компенсирует потребности системы в недостатке энергии для образования поверхности зародышей твердой фазы полностью. Рост зародышей идет со скоростью спокойной аналогичной кристаллизации (см. табл.2). Величина температурного градиента практически одинакова, как при кристаллизации без ВнВ.

При двукратном увеличении энергии ВнВ ($a=2,0$) температурный градиент уменьшается практически до нуля, оставаясь отрицательным, т.е. избыток энергии ВнВ идет на нагрев расплава, снижая температурный градиент на поверхности частицы твердой фазы.

При двукратном уменьшении энергии ВнВ ($a=0,5$) температурный градиент растет по модулю, что можно объяснить снижением скорости роста частиц твердой фазы (см. табл.2), которая обратно пропорциональна температурному градиенту.

Если энергетический коэффициент на 50 % превышает потребности системы ($a=1,5$), то скорость роста значительно возрастает, что повышает модуль температурного градиента, но избыток энергии ВнВ нагревает расплав, окружающий частицы твердой фазы и снижает температурный градиент на границе твердая фаза – расплав. Последняя тенденция превалирует над первой, что влияет на ход кривой 5 при $a=1,5$. Она проходит с меньшим углом наклона к оси отношения τ / τ_k , чем кривая 3 при $a=0,5$ (см. рис.1).

Таким образом, методом неравновесной термодинамики разработана оригинальная математическая модель изменения температуры поверхности частицы твердой фазы, растущей в кристаллизующемся расплаве, при ВнВ на металл. Данная модель включает в себя частными случаями изотермическую и неравновесную кристаллизацию без ВнВ, что свидетельствует о ее преемственности классической теории и достоверности.

Анализом выражений модели выявлено то, что ВнВ приводит к большему переохлаждению локальной области расплава, способствуя возникновению энергетической флуктуации и, в результате, зарождению кластера более устойчивого к росту, чем при кристаллизации без воздействия. Энергия ВнВ сильнее, чем при спокойной кристаллизации, интенсифицирует процессы диффузионного роста (внутренней диффузии в пористое тело зародыша) и, таким образом, выравнивая состав, способствуя большей структурной однородности растущей частицы твердой фазы.

Применение графоаналитического метода изучения изменения температурного градиента на поверхности частицы твердой фазы в кристаллизующемся расплаве позволило выявить новые закономерности тепломассопереноса и выдвинуть гипотезу формирования дозародыша твердой фазы, исследовать его температурное поле, предложить диффузионный механизм его роста до величины зародыша кристаллизации.

Анализ влияния ВнВ на температуру формирующейся в расплаве частицы твердой фазы показал, что для получения конкретных структур в результате кристаллизации металла и, следовательно, необходимого потребителю уровня свойств отливки нужно оптимизировать энергию ВнВ на затвердевающий расплав в интервале значений энергетического коэффициента от нуля до двух.

Список использованной литературы:

1. Ангелов Г.С. Влияние ультразвука на физико - химические свойства металлов. // Применение ультразвука в промышленности. / Под ред. А.И.Маркова. – М., 1975.–221с.
2. Базаров И.П. Термодинамика: Учебник для Вузов / И.П.Базаров – М.: Высш. шк.,1991. – 344 с.
3. Балакин Ю.А. Влияние внешнего воздействия на кинетику кристаллизации металлов / Ю.А.Балакин, М.И.Гладков // Электрометаллургия. – 2007. – №3. – С.6 - 12.
4. Балакин Ю.А. Моделирование теплообмена при кристаллизации металлов с внешним воздействием / Ю.А.Балакин, М.И.Гладков // Тезисы докл. V российск. семинара "Компьютерное моделирование физико - химических свойств стекол и расплавов", Курган, –2000. – С.76 - 77.
5. Балакин Ю.А. Теоретические основы внешних воздействий на жидкие и затвердевающие металлы / Ю.А.Балакин, М.И.Гладков, Е.Г.Савченко – М.: Радунца, – 2001. – С. 9 - 12.
6. Балакин Ю.А. Разработка новой теории внешних воздействий на процессы в конденсированных средах / Ю.А. Балакин [и др.] / Вестник МГОУ. Серия физико - математические науки. – 2014. №4. – С.119 - 123.
7. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика / Дж.Гиббс – М.: Наука. 1982. – 584с.

8. Гладков М.И. Термодинамический анализ условий зарождения и роста кристаллов при виброобработке металла / М.И.Гладков, Ю.А.Балакин, И.Ф.Гончаревич // Изв. вузов. Черная металлургия. –1989. – № 9. – С.27 - 29.

9. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов / Б.Б.Гуляев. – М.: Машиностроение, 1976. – 216с.

10. Дрозин А.Д., Рощин В.Е. Общая теория зарождения продуктов гетерофазных химических реакций в жидких растворах. // Черная металлургия: научные проблемы и технические решения: Юбилейный сб. науч. трудов. / Под ред. В.Е.Рощина – Челябинск: Изд - во ЧГТУ. – 1997. – С.30 - 57.

11. Задумкин С.Н. // Известия АН СССР отд. Металлургия и топливо. – 1965. – Т.1– № 55. –С.125.

12. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б.Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1965. – 615с.

13. Ефимов В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А.Ефимов, А.С. Эльдарханов – М.: Металлургия. 1995. – 272 с.

14. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И.Пригожин : пер. с англ. – М.: Иностранная литература. 1960. – 127с

15. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы / М.Фольмер. – М.: Наука, 1986. – 208с.

© Ю.А.Балакин, А.А.Будник, И.В.Соколов, 2015

УДК 681.5:622

И.В. Кулешов

к.т.н., доцент кафедры информатики и автоматизации
Филиал НОУ ВО Московский технологический институт в г.Оренбурге

О.Г. Москалёва

старший преподаватель кафедры информатики и автоматизации
Филиал НОУ ВО Московский технологический институт в г.Оренбурге

Г. Оренбург, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИИ ЗАМЕРНЫХ УЗЛОВ ЦЕХОВ ПО ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА

Задачами телемеханизации являются повышение эффективности технологического процесса, безопасности процессов и персонала, защита окружающей среды от неконтролируемых выбросов.

Развитие систем автоматизации позволило усовершенствовать управление технологическими процессами нефтегазовой отрасли [1]. Среди них в первую очередь следует назвать использование в области информационных технологий преимущественно принципов распределенных систем управления на базе микропроцессорных контроллеров, промышленных компьютеров и передового программного обеспечения.

Основное направление выполняемой комплексной программы развития автоматизации и автоматизированного управления - создание автоматизированных технологических комплексов (АТК), представляющих собой максимально автоматизированные, дистанционно управляемые объекты, разрабатываемые на базе микропроцессорной техники. С помощью таких автоматизированных систем достигается минимизация численности обслуживающего персонала в условиях периодического технического обслуживания технологического оборудования и систем автоматизации.

На основе создания и внедрения автоматизированных объектов (комплексов) решается задача перехода к принципиально новому поколению автоматизированных систем управления технологическими объектами - к системам информационно - управляющего типа, обеспечивающим радикальное повышение надежности и эффективности управления добывающими, транспортными и перерабатывающими предприятиями.

Технологической основой создания автоматизированных объектов с прогрессивными формами эксплуатации служит комплексный план технического перевооружения отрасли на базе нового технологического оборудования объектов с повышенным уровнем надежности работы и автоматизации процессов управления, а также реализация на действующих объектах комплекса технических решений по доводке, модернизации и обеспечению надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

Решение указанных вопросов требует широкого использования средств и систем автоматизации и телемеханизации, АСУ ТП производственными процессами, новых разработок, что обуславливает важность обобщения имеющегося опыта работы по созданию и внедрению в отрасли средств и систем автоматизации и телемеханизации, АСУ ТП на объектах нефтегазовой промышленности [6].

Комплексная телемеханизация замерных узлов цехов по добыче нефти и газа ЗАО «Газпром нефть Оренбург» имеет большое значение для развития отрасли в целом.

Узел замера обеспечивает измерение и учет количества газа, подаваемого в систему газлифта, а также выполняет функции смешения нескольких газовых потоков, распределения и регулирования подачи скомпримированного газа.

Узлы замера газа оборудованы подводящими и отводящими коллекторами высокого и низкого давления, замерными нитками, контрольно - измерительными приборами и устройствами, запорной, предохранительной и регулирующей арматурой, байпасной линией.

К особенностям объекта телемеханизации относятся:

- непрерывность технологических процессов;
- отдаленность технологического оборудования от центров управления и диспетчеризации;
- особые требования по надежности системы и обеспечению безопасности обслуживающего персонала (обеспечение резервирования, использование источников бесперебойного питания, система уровней доступа и паролей в программном обеспечении и т.д.);
- наличие большого количества технологического оборудования, работающего под открытым небом;
- высокий уровень пожароопасности и взрывоопасности технологического объекта.

Условия эксплуатации объекта телемеханизации включают в себя:

- режим работы технологического объекта непрерывный круглосуточный с остановкой только на время капитального ремонта, число рабочих дней в году не менее 360;

- категория объекта по пожарной опасности - А;

- класс взрывоопасности на наружных установках - В - 1 г.

Краткая характеристика района объектов ЦДНГ ЗАО «Газпром нефть Оренбург».

Климат района континентальный:

- абсолютная минимальная температура зимой – минус 42 °С;

- абсолютная максимальная температура летом – плюс 42 °С;

- глубина промерзания грунта – 1,7 м;

- высота снежного покрова достигает – 0,8 м.

Система предназначена для оперативного информационного контроля технологических параметров и поддержания оптимальных технологических режимов замерного узла ЦДНГ «Газпром нефть Оренбург», т.е. сочетает в себе элементы автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУ ТП) и автоматизированной системы обработки и передачи информации (АСОИ).

Система реализует информационную технологию в виде определенной последовательности информационно связанных функций, задач или процедур, выполняемых в автоматизированном (интерактивном) или автоматическом режимах [2].

Комплекс аппаратно - программных средств разрабатывается как система, рассчитанная на длительное функционирование в режиме реального времени.

Система должна обеспечить оперативный контроль технологических параметров замерного узла ЦДНГ «Газпром нефть Оренбург», включая сбор, накопление, обработку и отображение информации о ходе технологического процесса, поддержание оптимальных технологических режимов, аналитический контроль, предупредительную и аварийную сигнализацию.

Требования к системе телемеханики в целом.

Система разрабатывается для реализации следующих целей:

- уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций;
- повышение качественных показателей продукции;
- облегчение условий и повышение культуры труда технологического персонала, за счет предоставляемого системой сервиса;

- уменьшение количества выполняемых технологическим персоналом функций за счет их автоматизации;

- повышение качества и быстродействия управления и, как следствие, достижение высокого уровня стабилизации технологических режимов;

- повышение производительности технологических объектов за счет улучшения качества дистанционного управления технологическим процессом;

- повышение информационного обеспечения технологического и эксплуатационного персонала;

- повышение надежности работы самой системы управления за счет применения современных технических устройств на основе микропроцессорных средств и наличия самодиагностики;

- уменьшение материальных и энергетических затрат.

Достижение вышеозначенных целей будет способствовать также улучшению экологической обстановки в районах установки технологических объектов.

Критериями оценки достижения поставленных целей являются:

- безаварийность работы технологического объекта;
- сокращение случаев загрязнения окружающей среды;
- увеличение длительности межремонтного пробега технологического оборудования;
- сокращение материально - технических и энергетических затрат на производственные нужды;
- улучшение условий труда оперативного технологического и диспетчерского персонала.

Система должна строиться по иерархическому принципу. На каждом уровне должны присутствовать свои аппаратно - программные средства, взаимовызываемые для обеспечения сквозного обмена информацией между верхом и низом.

Структура системы должна позволять легко наращивать аппаратно - программные средства любого уровня и предусматривать возможность изменения конфигурации контролируемых параметров (добавление, переименование, удаление).

Система должна обеспечивать поступление текущей информации на автоматизированное рабочее место диспетчера в реальном масштабе времени.

Структура системы должна позволять объединять в единую АСУ ТП контроллеры различных производителей, выполненных в стандарте открытых систем [3].

Программно - технические средства нижнего уровня при потере связи с верхним уровнем управления должны обеспечивать работу в автономном режиме по заранее заданным параметрам и установкам.

Система должна иметь гибкую структуру, легко адаптироваться к изменениям характеристик технологических процессов во времени, обеспечивать модификацию алгоритмов решения задач и наборов, участвующих в них переменных, конфигурирование схем регулирования и управления, допускать расширение объема информационных задач и задач управления.

Компоненты системы должны иметь возможность изменения конфигурации (с определенными ограничениями, определяемыми уровнем доступа и системой паролей) эксплуатационным персоналом в оперативном режиме работы.

Требования к функциям, выполняемым системой телемеханики.

Система должна обеспечивать выполнение следующих функций:

- периодический опрос контроллеров системы с целью обновления информации о состоянии контролируемого оборудования, а также для передачи в контроллеры команд с верхнего уровня;
- преобразование информации, получаемой из контроллеров, к удобному виду, отражающему название сигнала, его текущее значение, время последнего обновления, размерность;
- обеспечение доступа к данным в режиме реального времени со стороны АРМ «Диспетчер»;
- архивирование всех входящих / исходящих данных в черновом архиве;
- преобразование информации из пространства контроллеров в информацию из пространства объектов;

- обновление вычисляемых и расчетных свойств объектов, контроль выхода значений параметров за технологические и аварийные пределы, обеспечение аварийной сигнализации;

- формирование базы данных по всем технологическим объектам с обновлением информации в реальном времени;

- архивирование изменений свойств объектов в базах данных;

- сохранение тревожных и аварийных сообщений в архиве аварий;

- визуализация технологического процесса в цифровом и графическом виде;

- просмотр ретроспективной информации из базы данных в графическом виде;

- обеспечение поступления в режиме реального времени текущей информации о состоянии технологических объектов на АРМ специалиста.

К функциям, реализуемым системой на нижнем уровне должны относиться:

- прием аналоговых (ТИТ) и дискретных (ТС) входных сигналов;

- счет импульсных сигналов (ТИИ);

- выдача управляющих сигналов (ТУ) на исполнительные механизмы (ИМ);

- опрос, регистрацию и архивирование технологических параметров в режиме реального времени в базе данных контроллеров;

- обмен информацией с АРМ диспетчера;

- дистанционное конфигурирование, т.е. в процессе работы должна иметься возможность менять настройки, установки и режим работы контроллеров.

Функции системы телемеханики замерного узла.

Система телемеханики характеризуется информационной мощностью:

- телесигнализация – ТС;

- телеизмерение текущее – ТИТ;

- телеизмерение интегральное – ТИИ;

- телеуправление – ТУ.

Телеизмерение интегральное (ТИИ):

- расход газлифтного газа.

Телеуправление (ТУ):

- управление электроприводными задвижками.

Телесигнализация (ТС):

- давление в коллекторе;

- несанкционированный доступ в шкаф телемеханики;

- сигнализация положения задвижки;

- сигнализация «контроль питания контроллера»;

- несанкционированный доступ в технологическое помещение.

Телеизмерение (ТИ):

- давление в коллекторе;

- давление газлифтного газа;

- давление в нефтесборном коллекторе НП;

- давление в нефтесборном коллекторе ВП;

- концентрация сероводорода.

Функции системы телемеханики выполняются в двух режимах: автоматическом и автоматизированном.

В автоматическом режиме выполняются:

- сбор и первичная обработка информации с датчиков;
- предупредительная и аварийная сигнализация, регистрация отклонений параметров от регламентных норм;
- защита технологического процесса и оборудования;
- формирование и печать журнала аварийных и технологических сообщений (ЖАТС);
- архивирование информации о ходе технологического процесса и состоянии оборудования;
- формирование видеокадров и отчетных документов;
- ведение базы данных.

Структура системы телемеханики определена, исходя из территориального расположения технологического оборудования, характеристик и номенклатуры существующих приборов, существующей линии связи между диспетчерским пунктом и замерным узлом. Система телемеханики замерного узла является системой централизованного контроля параметров технологического процесса замерного узла с функционально и территориально распределенной иерархической структурой.

Система телемеханики замерного узла включает в свой состав три уровня:

- первый уровень, это уровень оперативного персонала (инженер - метролог, диспетчер, начальник смены и оператор пульты);
- второй уровень, это уровень ПЛК, которые выполняют функции сбора информации, контроля технологических параметров и дистанционного управления;
- третий уровень, это уровень полевого оборудования КИП и А.

Третий уровень системы телемеханики замерного узла.

Третий уровень является уровнем полевого оборудования КИП и А.

Уровень полевого КИП и А должен осуществлять измерение, преобразование и передачу на второй уровень величин технологического процесса (давление, контроль загазованности и расход).

Второй уровень системы телемеханики замерного узла.

Уровень сбора и передачи данных является вторым уровнем системы телемеханики.

На этом уровне системы в автоматическом режиме обеспечивается сбор и передача на первый уровень технологических параметров с замерного узла.

Диспетчер осуществляет контроль текущего состояния замерного узла, следит за текущими расходами и давлениями на технологических линиях.

Сменный мастер при необходимости производит диагностику работы системы и организует устранение неисправностей.

Второй уровень системы телемеханики включает следующие оборудование:

- ПЛК СТК - Z181 - 05;
- контроллер КДП - 1200 [5];
- АРМ Диспетчера – (ПК сбора и передачи данных).

Первый уровень системы телемеханики замерного узла.

Первый уровень системы управления предназначен для организации человеко - машинного интерфейса и накопления информации о технологическом процессе.

На первом уровне с использованием программно - технических средств осуществляется оперативный контроль за текущим состоянием и режимами работы замерного узла, обмен информацией с нижним уровнем системы. Кроме того, на этом уровне реализуется функция хранения информации и предоставления её в виде суточных или месячных отчётов.

В состав первого уровня системы входят рабочие места диспетчера, технолога и геолога, рабочий сервер системы (станция системного инженера), необходимое сетевое оборудование.

Организация информационного обеспечения системы телемеханики отвечает следующим принципам:

- функциональная достаточность (полнота);
- надежность (в том числе восстанавливаемость, наличие средств выявления ошибок);
- адаптивность информационного обеспечения АС достаточна для достижения установленных целей ее функционирования в заданном диапазоне условий ее применения;
- модифицируемость, т.е. АС в целом и все виды ее информационного обеспечения приспособлены к модернизации, развитию и наращиванию в пределах требований;
- модульность построения, т.е. информационное обеспечение АС построено таким образом, чтобы отсутствие отдельных данных не сказывалось на выполнении функций АС, при реализации которых эти данные не используются;
- удобство эксплуатации, т.е. информационное обеспечение АС позволяет осуществлять настройку компонентов специального информационного обеспечения АС без прерывания процесса ее функционирования;
- контролепригодность, т.е. в информационном обеспечении АС реализованы меры по защите от ошибок при вводе и обработке информации, обеспечивающие заданное качество выполнения функций АС.

Коммуникационный сервер.

Коммуникационный сервер обеспечивает следующие функции:

- планирование и управление обменом с технологическими объектами;
- передача данных в другие подсистемы;
- организация очередей запросов на обмен информацией и выполнение команд управления;
- протоколирование обмена информацией.

Консоль диспетчера / оператора (автоматизированное рабочее место – АРМ диспетчера / оператора).

В функции подсистемы визуализации и оперативного контроля входят:

- получение информации о текущем состоянии в виде мнемосхем, таблиц;
- управление технологическим процессом.

Консоль оператора обеспечивает работу при подключении к системе по низкоскоростным каналам связи.

Сервер базы данных.

Подсистема обработки данных обеспечивает следующее:

- ведение базы данных по оборудованию;

- сбор, анализ, обработка, хранение, накопление технологической информации, полученной от коммуникационного сервера;
- удаление неактуальных данных согласно заданному регламенту;
- управление технологической базой данных;
- управление доступом в базу данных из других подсистем комплекса.

Подсистема внешних интерфейсов.

Подсистема внешних интерфейсов предоставляет возможность доступа к подсистемам комплекса из информационных систем более высокого уровня.

Внутренняя обработка данных состоит из следующих информационных потоков.

Обработка включает:

- обработку аварий, состояний, замеров;
- обработку событий;
- обработку результатов замеров ЗУ;
- формирование информационных файлов.

Обработка аварий, состояний, замеров.

Обработка аварийных сигналов заключается в поиске сигналов, подвергавшихся изменениям с момента последнего опроса и передаче этих изменений модулю обработки событий. Аварийные сигналы фиксируются в файле текущего состояния, и затем отражаются в таблице текущих и накопленных значений.

Обработка сигналов состояний производится по - разному. Некоторые состояния используются определенными формами визуализации, другие, аналогичны аварийным сигналам, а некоторые переходы порождают следующие специфические действия:

- нахождение средних, минимальных и максимальных значений некоторых замеров;
- накопление значений времени работы технологического оборудования и контроллеров в разных режимах;
- почасовая обработка, сохранение средних часовых данных, предельных значений и накопленных длительностей;
- ежесуточная обработка, сохранение ежесуточных значений.

Осуществляется запись текущих замеров в информационный файл.

Обработка событий.

К событиям следует отнести:

- начало и конец аварийного сигнала, переданного контроллером;
- существенное изменение состояния, переданное контроллером;
- команды оператора;
- сообщения, выработанные программами.

Управление событиями заключается в выработке дескриптора для каждого отмеченного события и упорядочении дескрипторов в двух файлах: Файл текущих событий. Содержит все существенные текущие события;

– Файл хронологии событий. Содержит все события, происшедшие за определенное время (время не фиксированное, зависит от размерности файла и количества событий).

Управление событиями обеспечивает непрерывность обработки при оперативном возобновлении системы. Таким образом, при обработке аварийных сигналов, состояний и замеров на мнемосхеме всегда отображается текущее состояние объектов.

Обработка автоматически вводимой информации на нижнем уровне производится в жестком временном цикле.

Дискретные управляющие сигналы вырабатываются системой в результате реализации управляющих функций (дистанционное управление, защитные функции). Характер и уровни этих сигналов адекватны исполнительным механизмам, на которые они подаются.

Хранение информации в системе в зависимости от ее характера и назначения производится на следующих носителях:

- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ);
- основное электрически программируемое постоянное запоминающее устройство (ЭППЗУ);
- перепрограммируемое ЭППЗУ для хранения изменяемых параметров;
- накопитель на жестком магнитном диске типа «Винчестер».

Система телемеханики ЦДНГ ЗАО «Газпромнефть Оренбург» оперирует со следующими основными потоками информации:

- информация о состоянии объекта, автоматически вводимая в систему с использованием датчиков, установленных на объекте;
- управляющие сигналы, поступающие из системы на исполнительные механизмы, установленные на объекте;
- звуковая сигнализация, автоматически выводимая на АРМ, для привлечения внимания диспетчера к нарушениям, зафиксированным системой;
- информация о состоянии объекта, выводимая оператору на мониторы по его требованию в удобном для восприятия виде;
- директивы управления, вводимые оператором - технологом с клавиатуры;
- информация, содержащаяся в отчетных документах, формируемых системой (рабочий журнал, журнал аварийных и технологических сообщений и т.д.);
- информация оперативному персоналу о параметрах объекта управления и параметрах системы управления, в том числе о вычисляемых параметрах, алгоритмах обработки и управления, о формах представления информации, вводимая в систему при ее конфигурировании;
- информация в базе данных системы.

Система автоматизации замерного узла (ЗУ) состоит из исполнительных механизмов, первичных преобразователей, датчиков контроля и сигнализации, устанавливаемых по месту, а также контроллера ЗУ, располагаемого в блок - боксе автоматизации. Система автоматизации ЗУ обеспечивает выполнение следующих функций:

- контроль по месту давления в выкидных трубопроводах от скважин и кустов скважин;
- автоматическое закрытие электроприводной задвижки, установленной на нефтегазосборном коллекторе, при аварийно низком давлении в нем ($P_{min}=0,85 P_{раб}$);
- контроль по месту давления в нефтегазосборном коллекторе;
- автоматическое закрытие электроприводной задвижки, установленной на газоингибиторопроводе (коллектор), при аварийно низком давлении в каждом из трубопроводов по направлению к скважинам ($P_{min}=0,85 P_{раб}$);
- контроль по месту давления в газоингибиторопроводе (коллектор);

- контроль по месту давления в газоингибиторопроводе;
- контроль по месту давления и расхода газа газлифтного в трубопроводах по направлении к скважинам;
- контроль загазованности на площадке ЗУ.

Основные технические решения по телемеханизации замерного узла.

Система телемеханики ЗУ обеспечивает возможность передачи информации о состоянии контролируемого объекта на ДП ЗАО «Газпром нефть Оренбург». Объем телемеханизации ЗУ включает:

- телеизмерение текущих значений давления в выкидных трубопроводах от скважин и кустов скважин;
- телеизмерение текущих значений давления в нефтесборном коллекторе;
- телеизмерение текущих значений давления в газоингибиторопроводе (коллектор);
- телеизмерение текущих значений давления и расхода газа газлифтного в трубопроводах по направлении к скважинам;
- телесигнализация состояния электроприводной задвижки, установленной на нефтесборном коллекторе («открыта», «закрыта»);
- телесигнализация состояния электроприводной задвижки, установленной на газоингибиторопроводе (коллектор) («открыта», «закрыта»);
- телеуправление электроприводными задвижками, установленными на нефтесборных коллекторах высокого и низкого давления, а также установленной на газоингибиторопроводе (коллектор).
- телесигнализация предельно - допустимой концентрации (ПДК) H_2S на площадке ЗУ;
- телесигнализация исчезновения напряжения, подаваемого на аппаратуру телемеханики;
- телесигнализация несанкционированного проникновения на площадку ЗУ.

С целью повышения надёжности системы телемеханизации ЗУ, принята концепция распределенной системы. При этом комплекс технических средств проектируется в виде функционально и территориально распределенной системы, представляющей собой вычислительную сеть. Абонентами сети являются:

- автоматизированное рабочее место диспетчера – АРМ «Диспетчер», АРМ «Технолог» и АРМ «Геолог» в административно - бытовом комплексе;
- программируемый логический контроллер СТК - Z181.5 в блок - боксе на замерном узле.

Комплекс технических средств (КТС) системы телемеханики замерного узла организован по двухуровневой структуре. На нижнем уровне системы используются ПЛК СТК - Z181.5 производства НПО «Интротест» г. Екатеринбург СТК - Z181.5, которые выполняют функции сбора информации, контроля технологических параметров и дистанционного управления [7].

Сбор информации и контроль осуществляется при помощи датчиков и приборов, расположенных на замерном узле. При помощи дистанционного управления приводятся в действие исполнительные механизмы.

На верхнем уровне решаются задачи дистанционного контроля и управления технологическим процессом. Для этого организуются АРМ «Диспетчер», АРМ «Технолог» и АРМ «Геолог» на базе персональных компьютеров.

В административно - бытовом комплексе располагаются:

- АРМ «Диспетчер», АРМ «Технолог» и АРМ «Геолог»;
- программируемый логический контроллер СТК - Z181.5.

ПЭВМ на диспетчерском пункте через порт COM1 и контроллер КДП - 1200 по радиоканальной линии связи будет работать с контроллером СТК - Z181.5, обслуживающим замерный узел.

АРМ «Диспетчер», АРМ «Технолог» и АРМ «Геолог» обеспечивают функции графического операторского интерфейса для дистанционного контроля и управления технологическими процессами.

АРМ специалистов строятся на базе процессора Pentium Dual - Core с тактовой частотой 1800 МГц (или с лучшими параметрами) и включают в свой состав, каждый: оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) объемом не менее 512 Мб; накопитель на жестких магнитных дисках (НЖМД) с объемом памяти не менее 120 Гб; дисковод для компакт - дисков CD - RW; монитор 21"; клавиатуру; сетевую LAN карту; сетевой концентратор HUB; звуковую карту; источник бесперебойного питания; громкоговорители [4].

В состав диспетчерского пункта входит контроллер диспетчерского пункта КДП - 1200, предназначенный для работы в составе диспетчерского пункта системы на основе контроллеров СТК - Z181.5. Он обеспечивает связь между компьютером диспетчерского пункта (интерфейс RS - 232C) и периферийными контроллерами по радиоканалу с помощью модема НЕВОД - 7.

Система имеет два уровня: уровень сбора информации с датчиков, первичной обработки информации, формирования пакетов данных и выдачи сигналов управления на исполнительные механизмы; уровень вывода визуализированной информации о состоянии датчиков, технологических параметров на монитор АРМ «Диспетчер» и АРМ «Технолог».

Принцип действия системы основан на принятии контроллером логических решений в строгом соответствии с заложенной программой на основе информации, полученной от внешних датчиков или с АРМ «Диспетчер» и выдаче соответствующих сигналов управления во внешние цепи на исполнительные механизмы. Система обеспечивает передачу информации о ходе и параметрах технологического процесса на автоматизированное рабочее место диспетчера и технолога.

Система соответствует выполнению основной задачи управления агрегатами, вспомогательным оборудованием и определяется версией программного обеспечения (ПО), записанной в память контроллера. Программное обеспечение дает возможность выполнения всех предусмотренных техническим заданием на разработку системы телемеханики, функций управления и регулирования.

Надежность системы в целом и каждой ее автоматизированной функции должна быть достаточна для достижения установленных целей функционирования системы при заданных условиях применения (пункт 1.1.7. ГОСТ 24.104 – 85).

При анализе надежности системы учитывается, что элементы, входящие в функциональную систему решают задачи взаимной компенсации некоторых нарушений

нормальной работы, предотвращая переход этих нарушений в отказы в выполнении соответствующей функции, либо минимизируя их неблагоприятные последствия.

Система обеспечивает диагностику ее технических средств в режиме нормальной работы. При разработке программного обеспечения верхнего уровня предусмотрены процедуры диагностирования состояния контроллеров и каналов связи. Контроллеры имеют средства для автотестирования с выдачей информации о состоянии на АРМ диспетчера.

Система телемеханики соответствует выполнению основной задачи управления агрегатами, вспомогательным оборудованием и определяется версией программного обеспечения (ПО), записанной в память контроллера. Программное обеспечение дает возможность выполнения всех предусмотренных техническим заданием на разработку АС функций управления и регулирования.

Внедрение системы телемеханики позволит:

- архивировать информацию о текущих показателях;
- создать комплексную систему диагностики технологического оборудования;
- осуществлять дистанционный контроль за данными;
- дистанционно изменять режим работы приборов;
- вносить корректировки в расчёты параметров технологического процесса из помещения операторной.

Список использованной литературы:

1. О введении в действие и признании утратившими силу нормативных документов в области надзора на опасных производственных объектах в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности [Электронный ресурс] : постановление Госгортехнадзора РФ от 25.07.2003 N105. – Режим доступа: КонсультантПлюс.
2. ГОСТ 34.602 - 89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы [Электронный ресурс]. – Утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 24.03.89 N 661. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-34-602-89>.
3. ГОСТ 24.104 - 85. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования [Электронный ресурс]. – Утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 20.12.85 N 4632. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24-104-85>.
4. ГОСТ 21552 - 84 Е. Средства вычислительной техники. Общие технические требования, правила приемки, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение [Электронный ресурс]. – Утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 28.06.1984 N 2206. – Режим доступа: КонсультантПлюс.
5. Контроллер КДП - 1200 [Электронный ресурс] : руководство по эксплуатации. – Режим доступа: <http://www.introtest.com>
6. Москалёва О. Г. Оптимизация процесса Клауса на установках получения элементарной газовой серы / О. Г. Москалёва, И. В. Кулешов, Е. М. Ибрагимов // Современное состояние естественных и технических наук : материалы XVIII Междунар. науч. - практ. конф. (Москва, 20 марта 2015 г.). – Москва : Спутник+, 2015. – С. 69 - 72.

7. Станция телемеханики кустовая СТК - Z181.5 [Электронный ресурс] : руководство по эксплуатации. – Режим доступа: <http://www.introtest.com>.

Spisok ispol'zovannoj literatury:

1. О vvedenii v dejstvie i priznanii utrativshimi silu normativnyh dokumentov v oblasti nadzora na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah v himicheskoy, neftehimicheskoy i neftepererabatyvayushhej promyshlennosti [Elektronnyj resurs] : postanovlenie Gosgortekhnadzora RF ot 25.07.2003 N105. – Rezhim dostupa: Konsul'tantPljus.

2. GOST 34.602 - 89. Informacionnaja tehnologija. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Tehnicheskoe zadanie na sozdanie avtomatizirovannoj sistemy [Elektronnyj resurs]. – Utv. i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosstandarta SSSR ot 24.03.89 N 661. – Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-34-602-89>.

3. GOST 24.104 - 85. Edinaja sistema standartov avtomatizirovannyh sistem upravlenija. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija. Obshhie trebovanija [Elektronnyj resurs]. – Utv. i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosstandarta SSSR ot 20.12.85 N 4632. – Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-24-104-85>.

4. GOST 21552 - 84 E. Sredstva vychislitel'noj tehniki. Obshhie tehnicheckie trebovanija, pravila priemki, metody ispytanij, markirovka upakovka, transportirovanie i hranenie [Elektronnyj resurs]. – Utv. i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosstandarta SSSR ot 28.06.1984 N 2206. – Rezhim dostupa: Konsul'tantPljus.

5. Kontroller KDP - 1200 [Elektronnyj resurs] : rukovodstvo po jekspluatacii. – Rezhim dostupa: <http://www.introtest.com>.

6. Moskaljova O. G. Optimizacija processa Klausa na ustanovkah poluchenija jelementarnoj gazovoj sery / O. G. Moskaljova, I. V. Kuleshov, E. M. Ibragimov // Sovremennoe sostojanie estestvennyh i tehnicheckih nauk : materialy XVIII Mezhdunar. nauch. - prakt. konf. (Moskva, 20 marta 2015 g.). – Moskva : Sputnik+, 2015. – S. 69 - 72.

7. Stancija telemehaniki kustovaja STK - Z181.5 [Elektronnyj resurs] : rukovodstvo po jekspluatacii. – Rezhim dostupa: <http://www.introtest.com>.

© И.В. Кулешов, О.Г. Москалёва, 2015

УДК 62

Л.Г. Ловцова, доцент кафедры «Микробиология, биотехнология и химия», к.т.н.
Саратовский Государственный Аграрный Университет им. Н.И.Вавилова, Саратов, РФ

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТИМУЛИРОВАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ МЕДНОЙ СОНОГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ И ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ультразвук (УЗ) – мощный способ стимуляции электрохимических процессов. Этому способствует весьма интенсивные акустические течения, типа течений Эккарта и Шлихтинга. Еще более сильно влияет на скорость электрохимических реакций ультразвуковая кавитация, что является следствием ударных волн и течений, возникающих при «схлопывании» кавитационных микропузырьков возле электродной поверхности, кавитационного нагрева объема электролита и его границы с электродом, эффективной дегазации и непрерывной очистки поверхности и т.д.

Одним из перспективных направлений использования УЗ является соноэлектроосаждение (СЭО) металлов применительно к задачам гальванопластики. Здесь УЗ во многом снимает проблему рассеивающей способности электролитов, что позволяет реализовывать равномерное СОЭ металлов даже при субмиллиметровых размерах формообразующих углублений, что недостижимо для традиционной гальванопластики.

Еще одним и даже более актуальным процессом, хорошо стимулируемым УЗ - кавитацией, является катодное выделение водорода, весьма актуального для технологий водородной энергетики. Очевидно, что конструкции современных водородных генераторов должны базироваться на новых, ранее неизвестных электрохимических принципах и технологиях, к которым можно отнести соноэлектрохимическое восстановление (СЭВ) водорода в узких каналах субмиллиметровых отверстий перфорированных металлизированных диэлектрических пластин.

Теория вышеупомянутых катодных процессов в настоящее время развита слабо, что и определяет актуальность настоящего исследования. В связи с этим, выяснение кинетических закономерностей катодного осаждения меди и выделения водорода в узких углублениях и отверстиях субмиллиметровых размеров при ускоряющем действии ультразвуковой кавитации применимо к задачам субмиллиметровой гальванопластики и водородной энергетики.

Для выяснения данных закономерностей были сформированы следующие задачи исследования: теоретические исследования кинетики электрохимических реакций СЭО металлов в субмиллиметровых формообразующих углублениях и СЭВ водорода на перфорированных катодах с учетом влияния УЗ - кавитации; экспериментальное исследование кинетики СЭО меди в субмиллиметровых формообразующих углублениях алюминиевых и цинковых пластин - матриц и СЭВ водорода в сквозных отверстиях перфорированных пластин из поликора с металлизацией стенок отверстий медью, сплавом олово - висмут и никелем; формулирование перспективных направлений применения полученных экспериментальных результатов в технологиях субмиллиметровой гальванопластики и водородной энергетики.

Теоретические исследования влияния УЗ кавитации на селективное электроосаждение металла в каналы субмиллиметровых формообразующих углублений.

Теоретические исследования механизма селективного электроосаждения металлов в каналах субмиллиметровых формообразующих углублений под влиянием УЗ - кавитации показали, что наложение достаточно интенсивных УЗ - колебаний должно сильно увеличивать скорость процесса за счет эффекта аррениусовской размерно - кавитационной селективности (АРКС) [4, 53 - 59]. Если в пределах зоны термического влияния на пластине - матрице выполнены формообразующие углубления, имеющие хотя бы одну ось симметрии, площадь поверхности S , объем Ω и начальный характерный размер $\Delta_0 \ll R_U$, которые удовлетворяют простому соотношению: $S / \Omega = \varphi / \Delta_0$, где φ – форм - фактор симметрии, а R_U – радиус кругового УЗ излучателя, то при наложении УЗ происходит постепенное зарастание углублений металлом и характерный размер со временем уменьшается. При этом механизм СЭО металла в углублениях основан на термической стимуляции реакции разряда катионов металла M^{z+} , имеющей кавитационную природу:



Согласно построенной математической модели электрохимического процесса СЭО, подробно изложенной в тексте диссертации, адиабатическое «схлопывание» кавитационных микропузырьков приводит к росту плотности тока локального СЭО металла $\bar{i}_A$ с увеличением интенсивности ультразвука W , фактора симметрии углубления

ϕ , степени раскрытости «устья» отверстия и уменьшением его начального характерного размера Δ_0 по сложному экспоненциальному закону [5, с. 125 - 127].

Коэффициент соноселективности (K_C) СОЭ меди при форм - факторе углубления $\phi=1-3$, увеличивается с интенсивностью и уменьшаться с частотой ультразвука по экспоненте, что доказывает возможность реализации УЗ соногальванопластики. Показано, что значения коэффициентов соноускорения K_y порядка нескольких десятков и соноселективности K_C порядка нескольких единиц можно получить в субмиллиметровом диапазоне характерных размеров формообразующих углублений при $\phi / \Delta_0 \gg 1 / \Lambda$ при относительно небольших коэффициентах теплопроводности материала матрицы. Здесь Λ - расстояние от головки УЗ излучателя, сопоставимого с толщиной пластины - матрицы ℓ . Для частоты ультразвука $f=22$ кГц нижняя граница селективного СОЭ металлов в формообразующие углубления отвечает условию $\Delta_0 \cong \bar{r}_{\text{пл}} = 100$ мкм ($\bar{r}_{\text{пл}}$ - радиус кавитационного микропузырька), в верхняя - $\Delta_0 \cong \phi \Lambda$, что и оправдывает название АРКС. При этом кавитация, проникающая в субмиллиметровые отверстия, из - за размерного эффекта оказывает значительно большее ускоряющее действие на электрохимический процесс, чем на поверхности пластины.

Влияние УЗ кавитации на катодное выделение водорода в каналах субмиллиметровых отверстий

Теоретическое рассмотрение процесса СЭВ водорода в каналах субмиллиметровых отверстий по реакциям Фольмера - Гейровского - Тафеля (2 - 4):



позволило получить кинетические уравнения, согласно которым локальная плотность тока $i_{\text{H}}^{\text{св}}$ СЭВ водорода в канале отверстия радиусом r_0 и коэффициент соноускорения K_Y^{H} увеличиваются с ростом перенапряжения соноэлектровыделения водорода η , парциального давления водорода $P_{\text{H}_2}^{\text{св}}$, плотности тока обмена i_0^{H} , по закономерностям замедленной реакции Фольмера (1), и модулируются весьма сложной функцией $F(f, W)$, учитывающей влияние кавитационного нагрева, цепного размножения кавитационных микропузырьков на водородных зародышах, топоэлектрохимического эффекта Бетчелора - Шлихтинга на динамический индекс кавитации $K_{\text{сав}}$ и омическое сопротивление внутриканального электролита. Свойства функции $F(f, W)$ таковы, что при малых значениях частоты ультразвука f , перенапряжения выделения водорода η и коэффициента кавитации $K_{\text{сав}}$ она быстро нарастает с интенсивностью ультразвука W , а при больших значениях этих параметров – обращается в нуль, что соответствует полному вытеснению электролита из канала отверстия. При этом существуют оптимальные значения f^* , W^* , η^* , и $K_{\text{сав}}^*$ для которых максимальное значение K_Y^{H} может достигать ≈ 100 , что подтверждается экспериментами и доказывает принципиальную возможность реализации высокопроизводительного УЗ генератора водорода с применением проточных пластинчатых электродов, перфорированных субмиллиметровыми отверстиями.

Процесс кавитационного выделения водорода в отверстиях может быть оптимизирован, согласно формальной процедуре:

$$K_Y^* = K_Y(f^*, W^*, \eta^*) = \max[K_Y(f, W, \eta)], \quad (5)$$

где звездочкой помечены оптимальные параметры. При этом из свойств функции $F(f, W)$ следует, что оптимальная частота ультразвука f^* отвечает низкочастотной области УЗ облучения.

Экспериментальные исследования локального соноэлектроосаждения меди в субмиллиметровых формообразующих углублениях Al - и Zn - матриц

Эксперименты по СОЭ меди выполнялись в электростатическом режиме на ультразвуковой электрохимической установке, включающей: генератор высокочастотных (КД ОММ.3.541.106.) или низкочастотных (УЗДН - 2Т) колебаний с пьезоэлектрическим ($f_{рез}=833$ кГц) или магнитострикционным ($f_{рез}=22 - 44$ кГц) излучателем при интенсивности от 0 до 11,2 Вт / см². В качестве катодов использовались прямоугольные пластины из алюминия и цинка, выбор которых обусловлен возможностью избирательного травления их в крепких щелочных растворах, с линейными размерами 3х1 см² и толщиной $\ell=0,05 - 0,1$ см. Механической обработкой или лазерной прошивкой на них выполнялись формообразующие углубления в виде сквозных прямоугольных щелей ($\varphi=1$), цилиндрических ($\varphi=2$) и усеченных конических сквозных отверстий ($\varphi=3$), с характерными размерами Δ_0 , варьируемых в субмиллиметровом диапазоне. Анодным материалом служила медь марки МВ. Состав электролита (г / л): CuSO₄·5H₂O – 80, H₂SO₄ – 130, синтанол ДС - 10 – 1 - для СОЭ меди; NaOH – 100...400 – для селективного травления алюминия и цинка в присутствии меди. Время полного окончания процесса τ_Δ при зарастивании углублений фиксировалось, после извлечения образца из ячейки, просмотром «на просвет», с выборочной проверкой полноты заполнения по методике поперечных микрошлифов. Средняя скорость осаждения металла $\bar{j}_\Delta$ за время электролиза τ_Δ , коэффициент соноускорения осаждения металла K_y , экспериментальная средняя скорость электроосаждения металла без наложения ультразвука $\bar{j}_{W=0}^\Delta$, коэффициент соселективности K_c , средняя скорость осаждения металла в «окне» на незамаскированной поверхности образца $\bar{j}_\square$, вычислялись по формулам:

$$\bar{j}_\Delta = \Delta_0 / \varphi \cdot \tau_\Delta \quad (6)$$

$$K_y = \bar{j}_\Delta / \bar{j}_{W=0}^\Delta \quad (7)$$

$$\bar{j}_{W=0}^\Delta = \Delta_0 / \varphi \cdot \tau_\Delta \quad (8)$$

$$K_c = \bar{j}_\Delta / \bar{j}_\square \quad (9)$$

$$\bar{j}_\square = \Delta m / \rho_M \cdot S_\square \tau_\Delta, \quad (10)$$

где Δm – приращение массы образца за время соноэлектролиза τ_Δ , измеренное на электронных весах ВЛЭ 134, ρ_M – плотность металла, $\bar{j}_\square$ – линейная скорость осаждения металла на незамаскированном «окне», $S_\square$ – площадь незамаскированного «окна».

Коэффициент производительности K_Π принимался численно равным:

$$K_\Pi = 60 / \tau_\Delta \quad (11)$$

Коэффициент разрешения определялся из соотношения:

$$K_r = \bar{r}_\Pi / \Delta_0, \quad (12)$$

где $\bar{r}_\Pi$ - средний радиус кавитационного микропузырька. При типичных значениях $\bar{r}_\Pi$ и Δ_0 , коэффициент разрешения составлял 1.

Коэффициент погрешности выяснялся с помощью фотографий поперечных микрошлифов заросших металлом углублений и расшифровывался по формуле:

$$K_\Delta = \Omega_M^\Delta / \Omega, \quad (13)$$

где Ω_M^Δ - объем металла в углублении, Ω - объем углубления.

Компромиссный индекс оптимизации определялся из соотношения:

$$КИО = \frac{K_y K_\Pi K_c K_r K_\Delta}{K_y + K_\Pi + K_c + K_r + K_\Delta} \quad (14)$$

Исследования состава поверхностного слоя гальванических осадков меди производились с помощью Оже - электронных спектров на установке 09 ИОС - 10 04 и методом вторичной масс - ионной спектроскопии (ВИМС) на установке МС 7201 М.

Изучение морфологии поверхности осадка металла выполнялось на приборе ЭВМ - 100 - Б методом оттененных платиной углеродных реплик (электронная микроскопия), а крупнозернистых осадков – на приборе РЭМ - 10 (растровая микроскопия).

Микротвердость гальванического покрытия по Виккерсу измерялась прибором ПМТ - 3. Плотность металлического осадка меди определялась по методике поперечных шлифов.

Для СЭВ водорода в качестве катодов использовались прямоугольные пластины из керамики ВК - 100 - 1 (поликор), металлизированные Cu, Ni, сплавом Sn - Bi по хромовому подслою, с толщиной слоя металлизации 6 - 9 мкм и толщиной пластины $\ell=1$ мм. Линейные размеры катодов 30х10 мм². Лазерной прошивкой в центральной части пластины выполнялись отверстия диаметром 0,3 мм, подвергаемые химической металлизации медью, с последующим нанесением гальванического сплава олово - висмут или никеля.

Рабочие электролиты: H₂SO₄ + NaOH, pH=1 (№1) и H₂SO₄ + NaOH, pH=5 (№2). Коэффициент соноускорения рассчитывался по отношению силы катодного тока I_H^{cav} при ультразвуковом облучении к силе катодного тока без ультразвука:

$$K_V^H = \frac{I_H^{cav}}{I_H} \quad (15)$$

Экспериментальные результаты СЭО Cu в формообразующие углубления Al и Zn матриц, выбор которых обусловлен возможностью избирательного травления Al и Zn в щелочных растворах, не взаимодействующих с Cu. В полном согласии с теорией экспериментально установлено, что из - за большего коэффициента теплопроводности Al - матрицы менее эффективны по сравнению с Zn - матрицами, поэтому здесь мы ограничимся только последними.

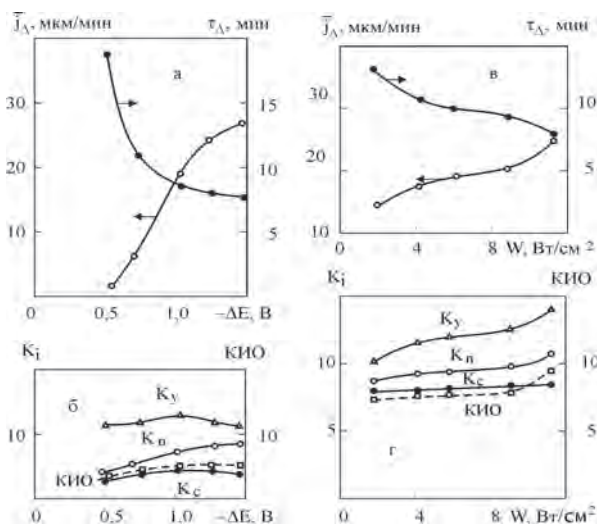


Рис. 1. Зависимости $\bar{j}_A$, τ_A - ΔE (а), K_i - ΔE (б), $\bar{j}_A$, τ_A - W (в), K_i - W (г) для СОЭ меди в сквозные отверстия Zn - матриц при $r_0=0,3$ мм, $\ell=1$ мм, $W=8,4$ Вт / см² (а,б) и $\ell=0,5$ мм (в,г). $K_i=K_y, K_n, K_c$

СОЭ меди $\bar{j}_\Delta$ увеличивается, а время заращивания углубления τ_Δ уменьшается с поляризацией (рис.1, а) и максимум КИО приходится на $\Delta E^* = -1,0$ В (рис. 1, б) и при этой оптимальной поляризации скорость процесса увеличивается, время заращивания уменьшается с интенсивностью ультразвука (рис. 1 в), при этом максимум КИО* отвечает $W^* = 8,4$ Вт / см² (рис.1, г). В соответствии с теорией, интенсивные параметры СОЭ меди зависят от глубины и топологических особенностей углублений (рис. 2, 3). При ΔE^* и W^* рост параметра $2r_0 / \ell$ (степень «раскрытости» углубления) способствует уменьшению τ_Δ и увеличению $\bar{j}_\Delta$ (рис. 2, а, б). Уменьшение толщины пластины вдвое дает дальнейший рост $\bar{j}_\Delta$ и уменьшение τ_Δ (рис.2, в, г) при увеличении КИО* до 8. Увеличение форм - фактора ϕ приводит к уменьшению τ_Δ и росту $\bar{j}_\Delta$ (рис.3, а), однако зависимости $\ln \bar{j}_\Delta - \phi$ и $\ln K_i - \phi$ нелинейны (рис. 3, б), что является следствием снижения эффективности СОЭ меди в линейных прорезах с $\phi=1$. При этом коэффициент заполнения углублений K_Δ составляет 0,8. Уменьшение толщины пластины вдвое способствует увеличению $\bar{j}_\Delta$ (рис.3, в) при достижении $K_\Delta=1$. При этом зависимости $\ln K_i - \phi$ в полном соответствии с теорией оказываются линейными, а КИО* $\cong 8 - 10$.

Из величин $K_c=4 - 8$ можно оценить энергию активации $A_E \cong 10 - 20$ кДж / моль при среднем значении этой величины, соответствующей энергии активации вязкого потока $A_D=16$ кДж / моль. Поэтому, с учетом почти линейного хода кривых $\bar{j}_\Delta - \Delta E$, можно сделать вывод о диффузионно - омическом контроле внутриканального СЭО Cu.

Из величин $K_c=4 - 8$ можно оценить энергию активации $A_E \cong 10 - 20$ кДж / моль при среднем значении этой величины, соответствующей энергии активации вязкого потока $A_D=16$ кДж / моль. Поэтому, с учетом почти линейного хода кривых $\bar{j}_\Delta - \Delta E$ (рис. 1 а), можно сделать вывод о диффузионно - омическом контроле внутриканального СЭО Cu.

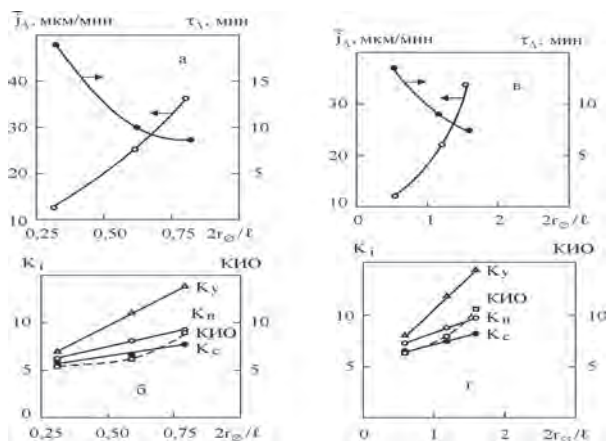


Рис. 2. Зависимости $\bar{j}_\Delta$, τ_Δ , $K_i - 2r_0$ для СОЭ меди в сквозные отверстия Zn - матриц при $\Delta E = -1,0$ В, $W=8,4$ Вт / см², $\ell=1$ мм (а,б) и $\ell=0,5$ мм (в,г). $K_i = K_y, K_n, K_c$

Анализ конструктивных возможностей разработанного нами способа субмиллиметрового соногальваноупластического формообразования показал, что при

комбинировании СЭО Си в формообразующие углубления с электроосаждением Си на незамаскированную поверхность Al, Zn - матриц и избирательным травлением металла матрицы возможно изготовление широкого спектра медных конструкций с субмиллиметровыми размерами топологических особенностей.

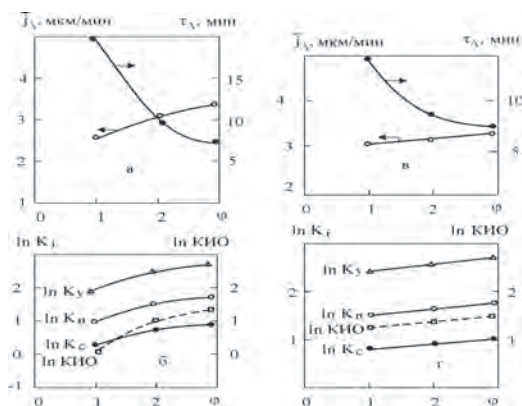


Рис. 3. Рис. 2. Зависимости j_{Δ} , τ_{Δ} , K_i – ϕ для СЭО меди в сквозные отверстия Zn - матриц при $\Delta E = -1,0$ В, $W=8,4$ Вт / см^2 , $\ell=1$ мм (а,б) и $\ell=0,5$ мм (в,г). $K_i = K_y, K_{\Gamma}, K_C$

Соноэлектрохимическая генерация водорода в металлизированных каналах субмиллиметровых отверстий

Установлено, что, что высокочастотное (ВЧ) СЭВ H_2 при $f=833$ кГц и $W=0-1,2$ Вт / см^2 в омедненных каналах субмиллиметровых отверстий из электролита №1 при $\Delta E \leq -0,33$ В протекает с омическим контролем, отвечающим токообразующему потоку H_3O^+ с энергией активации 14,2 кДж / моль и потому малоэффективно (рис.4), что можно объяснить повышением электропроводности внутриканального электролита Расчет коэффициента соноускорения показал, что максимум $K_{\text{H}}^{\text{H}} \approx 10$ приходится на «квазитафелевский» участок I и отвечает $\Delta E = -0,1$ В. В области II омического контроля ускорение K_{H}^{H} 1,2 – 1,8.

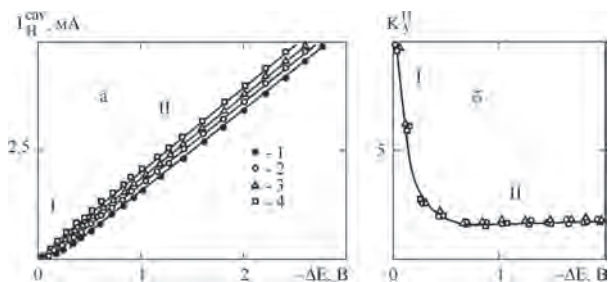


Рис. 4. Зависимости $j_{\text{H}}^{\text{sav}}$ – ΔE (а) и K_{H}^{H} – ΔE (б) для соновыделения водорода в медненных отверстиях с $r_0=0,15$ мм, $\ell=1$ мм из электролита № 1 при $f=833$ кГц и W , Вт / см^2 : 1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,5; 4 – 1,2.

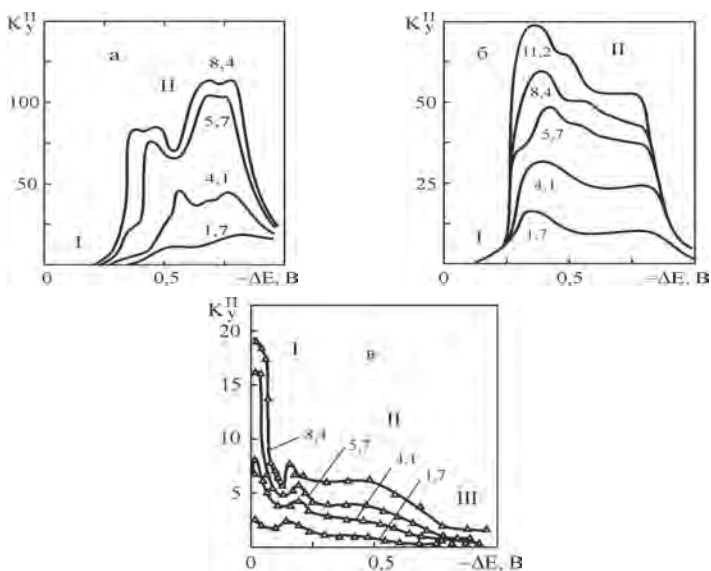


Рис.5. Зависимости K_y^H - ΔE для СЭВ водорода из электролита №1 на стенках отверстий $r_0=0,15$ мм и $\ell=1$ мм, покрытых Cu (а), Sn - Bi (б) и Ni (в) при $f=22$ кГц.

Цифрами на кривых обозначена интенсивность УЗ, Вт / см^2

Наложение низкочастотного (НЧ) УЗ приводит к достаточно большим величинам соноускорения выделения водорода из сильноокислого электролита №1 (рис. 1), которые могут достигать $K_y^H=110$ – для Al_2O_3 / Cu – отверстий при $\Delta E= -0,75$ В и $W=8,4$ Вт / см^2 (а) или $K_y^H=74$ для Al_2O_3 / Sn - Bi – отверстий при $\Delta E= -0,33$ В и $W=11,2$ Вт / см^2 (б). Зависимость K_y^H - ΔE для Al_2O_3 / Ni - отверстий имеет принципиально иной вид (в). При $W=8,4$ Вт / см^2 максимум $K_y^H=19$ приходится на малые поляризации, после чего K_y^H снижается, проходя второй локальный максимум $K_y^H=8$ при $\Delta E= -0,15$ В и плато $K_y^H=6$ при $\Delta E= -0,2.. -0,5$ В [2, с. 104].

На кривых K_y^H - ΔE для Al_2O_3 / Cu и Al_2O_3 / Sn - Bi – отверстий (рис.5, а и б) можно различать участки I быстрого начального подъема и участки II реализации локальных максимумов и плато, после которых на участках III происходит резкий спад K_y^H . Очевидно, что локальные максимумы и плато на участках II относятся к давно известным из литературных данных двум формам H_{ad} , различающимся по прочности связи с поверхностью металлов. При этом в Al_2O_3 / Cu - отверстиях основной вклад в соноускорение дает более прочно связанная форма H_{ad} , а в Al_2O_3 / Sn - Bi - отверстиях, наоборот, менее прочно связанная форма H_{ad} . Зависимость K_y^H - ΔE для Al_2O_3 / Ni - отверстий имеет принципиально иной вид (рис. 5, в). При $W=8,4$ Вт / см^2 максимум $K_y^H=19$ приходится на малые поляризации, после чего K_y^H

снижается, проходя второй локальный максимум $K_y^H=8$ при $\Delta E = -0,15$ В и плато $K_y^H=6$ при $\Delta E = -0,2 \dots -0,5$ В.

Анализ вольтамперных характеристик НЧ СЭВ водорода в Al_2O_3 / Cu и $Al_2O_3 / Sn - Bi$ отверстиях позволяет сделать вывод о том, что наиболее вероятной причиной быстрого подъема кривых на участках I является замедленность реакций Фольмера (2) при малых величинах катодной поляризации ΔE и индекса кавитации K_{cav} , что отвечает энергии активации $A_E=44 - 47$ кДж / моль. В области средних поляризаций II при $0,2 \leq K_{cav} \leq 0,8$ реализуется значительное омическое торможение НЧ СЭВ водорода за счет высокой внутриканальной концентрации водородно - кавитационных микропузырьков при $A_E=29 - 44$ кДж / моль. Кроме этого сказывается влияние замедленности реакций Гейровского (3) и Тафеля (4), весьма чувствительных к прочности связи адсорбированного водорода с поверхностью металла, что и является причиной появления локальных максимумов и плато на этом участке кривой. Наконец, в области III больших поляризаций при $K_{cav} \cong 1$ происходит вытеснение внутриканального электролита микропузырьковой суспензией.

Катодное кавитационно - электрохимическое поведение никелированных отверстий определяется величиной рН исследуемого сернокислого раствора. Увеличение рН электролита до 5 (№2) приводит к росту I и K_y^H в каналах никелированных отверстий (рис. 6). При этом поляризация максимума кривых $K_y^H - \Delta E$ смещается на величину порядка 1 В, по сравнению с оловянированными отверстиями, однако крутизна вольтамперных характеристик сильно уменьшается. В области I из - за малой активности ионов H_3O^+ во внутриканальном электролите реакция Фольмера протекает со смешанным активационно - омическим контролем, а в области II реакции Фольмера и Гейровского идут с преобладанием омического контроля. Плато при $\Delta E = -2 \dots -3$ В, по - видимому отвечает наличию прочно связанной с поверхностью никеля адсорбированной формы атомарного водорода и влиянию реакции Тафеля. Поэтому такой процесс может быть использован для соноэлектролиза воды, обычное значение рН которой близко к 5 из - за растворенного в ней углекислого газа.

Итак, на основании проведенных экспериментов, можно констатировать, по крайней мере, качественное согласие полученных результатов с теорией. Облегчение процесса достигается за счет топокинетического эффекта – частичной затраты энергии кавитационного коллапса на работу образования зародышей водородной газовой фазы.

Эффективность процесса, оцениваемая по коэффициенту соноускорения, зависит от парциального давления водорода, растворенного во внутриканальном электролите. Она увеличивается с ростом катодной поляризации при малых парциальных давлениях и, проходя через глобальный максимум, уменьшается при больших парциальных давлениях. В области больших парциальных давлений реализуется замедленная реакция Фольмера, генерирующая слабосвязанную форму адсорбированного водорода, в области средних и больших парциальных давлений.

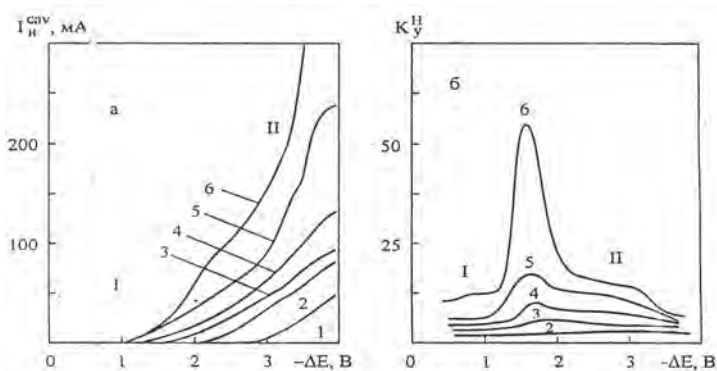


Рис.6. Зависимости $I - \Delta E$ (а) и $K_Y^H - \Delta E$ (б) для соновыделения водорода в никелированных отверстиях с $r_0 = 0,15$ мм, $\ell = 1$ мм, из электролита № 2 при $f=22$ кГц и W , Вт / см²: 1 – 0; 2 – 1,7; 3 – 4,1; 4 – 5,7; 5 – 8,4; 6 – 11,2.

Технология изготовления ТЭНов для кипятильников и парогенераторов с высокoeffективной теплообменностью на основе элементов субмиллиметровой шероховатости как перспектива практического применения

Высокие параметры СЭВ металлов процессов могут быть использованы для создания на металлических поверхностях нагревательных элементов искусственной шероховатости, которая позволит значительно интенсифицировать процессы кипения и испарения.

В одном из вариантов этого метода на поверхность нагревательного элемента наносится медный подслои и цинковое покрытие с толщиной порядка $h=0,1 - 1$ мм, в котором через защитный слой лака выполняются цилиндрические отверстия диаметром $2r_0=0,3-0,5$ мм, таким образом, что они образуют правильную пространственную решетку, элементарная ячейка которой представляет собой квадрат из четырех отверстий, расположенных на расстоянии S друг от друга. Затем производится ультразвуковое электроосаждение меди в каналы отверстий и, после снятия защитного лака, селективное растворение цинка в крепкой щелочи. При этом на поверхности образуются элементы шероховатости в виде цилиндрических «столбиков» на медном подслое и в финишной обработке вся поверхность покрывается никелем или серебром с помощью химического никелирования или серебрения.

Если n – число «столбиков», составляющих одну из сторон правильной квадратной решетки искусственной шероховатости поверхности, то число «столбиков» в расчете на одну элементарную ячейку составляет $n^2 / (n - 1)^2$ и в пределе, при достаточно большом n , это отношение равно 1. Площадь поверхности «столбика» равна: $2\pi r_0 h + \pi r_0^2 = \pi r_0 (2h - r_0)$, причем из эксперимента по СОЭ меди в отверстиях Zn - матриц оптимальное соотношение $r_0/h=0,8$. Поэтому технологически оптимальная площадь столбика равна $2,8 \pi h^2$. Если S_f – геометрическая площадь поверхности нагревателя, то суммарная площадь с учетом искусственной шероховатости составит:

$$S_{\Sigma} = S_f + 2,8\pi \cdot S_f \cdot h^2/s^2 = S_f (1 + 2,8\pi \cdot h^2/s^2)$$

Представляется следующая физическая картина работы нагревателя с искусственной шероховатостью поверхности: вначале сравнительно быстро нагревается его объем и поверхность и начинается теплоотдача в режиме свободной конвекции, а затем устанавливается режим развитого пузырькового кипения, в котором и заканчивается весь процесс кипения.

Расчет общего среднего теплообмена в режиме естественной конвекции дал результаты, представленные на рис 7, из которого следует, что величина среднего теплообмена увеличивается с ростом шероховатости (h / S) по некоторому параболическому закону, причем крутизна кривых нарастает с увеличением высоты столбика.

Шероховатость уменьшает энергетический порог парового зародышеобразования и расчет коэффициентов пузырькового теплообмена дал результаты, представленные на рис. 8. Согласно этим данным, при больших искусственных шероховатостях $h / s = 2$ и пороговой интенсивности теплового потока происходит наиболее облегченное выделение пузырьков пара на элементах шероховатости поверхности нагревателя, обеспечивающих эффективную толщину жидкостных прослоек, в которых идет передача тепла посредством теплопроводности. Напротив, при критической интенсивности и всех шероховатостях наблюдается затрудненность теплообмена при увеличении эффективной толщины жидкостной прослойки до $\delta = 17,1 \cdot 10^{-6}$ м, что можно связать с блокировкой углублений поверхности крупными паровыми пузырьками.

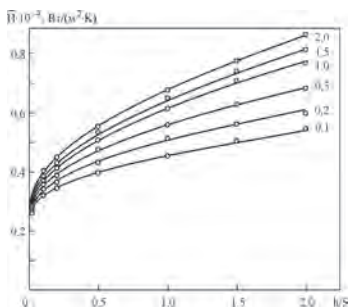


Рис. 7. Расчетные зависимости $\bar{N} - h/s$, полученные при высотах цилиндрических элементов шероховатости h , приведенных на кривых в мм

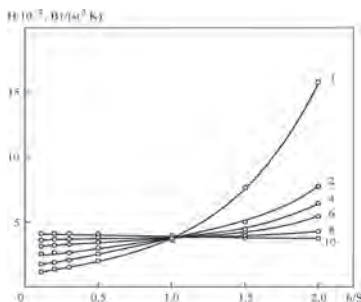


Рис.8. Расчетные зависимости $N - h/s$, полученные при высотах цилиндрических элементов шероховатости h , приведенных на кривых в мм

При малых шероховатостях $h / s = 0 - 0,5$ происходит закономерное снижение теплообмена вплоть до достижения эффективной толщины жидкостной прослойки диффузии тепла $\delta = 62,2 \cdot 10^{-6}$ м, характерной для гладкой поверхности.

Коэффициент ускорения кипения определяется влиянием шероховатости поверхности на процесс естественной конвекции. Соответствующие расчетные данные приведены на рис 5, из которого следует, что коэффициенты ускорения увеличиваются с высотой столбиков и при $h = 2$ мм могут достигать величин 40 – 60 для $h / s = 2$ [1, с. 111]

Построенная математическая модель ускорения кипения на поверхностях с искусственной субмиллиметровой шероховатостью, доказывает возможность реализации высокоэффективных теплообменных поверхностей. Адекватность модели подтверждена экспериментально.

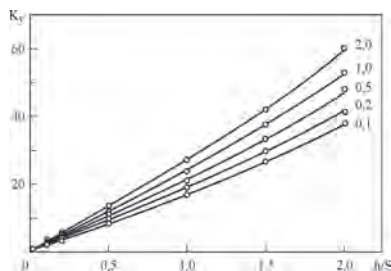


Рис. 9. Расчетные зависимости $\gamma - h / s$, полученные при высотах цилиндрических элементов шероховатости h , приведенных на кривых, в мм

Разработанный способ высокоскоростной генерации водорода в отверстиях металлизированных диэлектрических пластин весьма перспективен для создания промышленных УЗ электролизеров, рабочим элементом которых будут катоды, перфорированные отверстиями субмиллиметровых размеров, с химической металлизацией стенок. Если в качестве материала катода взять поликор (Al_2O_3 – керамика), то при радиусе отверстия 0,015 см способом лазерной прошивки на установке с ЧПУ можно получить не более 123 отверстий на 1 cm^2 поликоровой пластины толщиной 0,1 см.

Результаты расчета некоторых технических параметров ультразвуковой электрохимической генерации водорода в субмиллиметровых металлизированных отверстиях поликоровых пластин при исходных данных, отвечающих экспериментам на единичных отверстиях, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры УЗ - электрохимической генерации водорода в субмиллиметровых металлизированных отверстиях при минимально возможных расстояниях между ними и $S_r=100 \text{ cm}^2$

Металлизация отверстий	Электролит	$\Pi_1, \text{м}^3 \cdot \text{ч}$	$\Pi_{\text{ж}}, \text{м}^3 \cdot \text{ч}$	$P_{\Sigma}, \text{кВт}$	$\mathcal{E}, \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$
Cu	№ 1	0,124	1530	2070	1,35
Sn - Bi	№1	0,025	308	423	1,37
Ni	№2	0,012	148	203	1,35

Из данных таблицы следует, что производительность процесса весьма велика и варьируется в пределах $148 - 1530 \text{ м}^3 / \text{ч}$ при площади катода 100 см^2 , поверхностной плотности отверстий 123 на сантиметр и энергозатратах $1,35 - 1,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$. По величине производительности генерации водорода в расчете на 1 см^2 геометрической поверхности катода наивысшими показателями обладает медная металлизация отверстия, работающая в кислом электролите №1, а наименьшим – никелевая металлизация в слабокислом электролите №2 с $\text{pH}=5$ экономичность [3, с. 59 - 60].

Однако, в коррозионном отношении медная металлизация ненадежна в условиях сильного кавитационного перегрева стенок отверстий. Кроме того, медь подвержена интенсивной кавитационной эрозии, что в конечном итоге будет приводить к быстрому износу катода. Сказанное относится и к сплаву олово – висмут. Поэтому наиболее надежной будет никелевая металлизация стенок отверстий, обеспечивающая большой ресурс работы катода. Кроме того, при изучении СЭВ водорода в никелированных отверстиях, было установлено, что плотность тока, соответствующая поляризации максимума на кривых $K_y^H - \Delta E$ может достигать $i_{\text{max}}^{\text{cav}} \approx 0,85 \text{ А} / \text{см}^2$, что доказывает возможность использования такого катода для высокопроизводительной генерации водорода путем соноэлектролиза технической воды, значения pH которой близко к 5 из-за растворенного в ней углекислого газа. И если плотности тока в промышленных электролизерах колеблются в пределах от 0,06 до 0,1 $\text{А} / \text{см}^2$, то повышение производительности генерирующего узла электролизера на порядок при к.п.д. магнитострикционных излучателей около 50 % явно перекроет затраты электроэнергии на создание ультразвукового поля. Технико - экономические расчеты использования таких устройств показывают их высокую.

На основании теоретических исследований влияния ультразвуковой кавитации на кинетику селективного электроосаждения металлов в каналах формообразующих углублений субмиллиметровых размеров выяснена возможность высокоскоростного и селективного течения процесса с сильной зависимостью коэффициентов ускорения и селективности от интенсивности и частоты ультразвука, симметрии формы углублений и теплофизических параметров металла матрицы, и из выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Построенная теория соноэлектрохимического выделения водорода в узких отверстиях перфорированных катодов из сернокислых электролитов на основании адсорбционно - электрохимической кинетики протекания реакций Фольмера - Гейровского - Тафеля. При этом установлено, что эффективность СЭВ водорода сильно зависит от частоты и интенсивности ультразвука, парциального давления водорода в отверстиях и адсорбционной способности металла покрытия стенок отверстий;

2. Экспериментальными исследованиями в потенциостатических условиях, показана выполнимость теории соноэлектрохимического выделения водорода для субмиллиметровых отверстий в поликорковых пластинах с металлизацией стенок отверстий медью, сплавом олово - висмут, никелем в сернокислых электролитах с $\text{pH}=1$ и $\text{pH}=5$ при достижении максимальных коэффициентов ускорения ($K_y^H=75 - \text{Sn} - \text{Bi}$ - металлизация; $K_y^H=105$ – медная металлизация; $K_y^H=50$ – никелевая металлизация стенок отверстий).

3. Высокие параметры выделения водорода в узких отверстиях перфорированных катодов из слабокислых электролитов доказывают возможность реализации высокоэффективных электролизеров технической воды. Разработан технологический маршрут изготовления перфорированного катода и схема высокопроизводительного УЗ электролизера.

Список использованной литературы:

1. Ловцова Л.Г. Теплообмен при нагреве поверхности с искусственной субмиллиметровой шероховатостью / Л.А. Фоменко, Л.Г. Ловцова // Журнал Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. Москва: – 2010 года – № 2, – С. 109–112.
2. Ловцова Л.Г. Стимулированный УЗ кавитацией процесс электрохимического выделения водорода в узких каналах субмиллиметровых размеров. / Фоменко Л.А. // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Волгоград: 2011, –С. 104.
3. Ловцова Л.Г. Экономическая эффективность ультразвуковой генерации водорода / Сборник статей XII Международной научно - практической конференции, Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества, 3 - 4 июля 2014 г. – Москва: Спецкнига, 2014. - С. 58 - 61.
4. Ротинян А.Л. Теоретическая электрохимия / А.Л.Ротинян, К.И.Тихонов, И.А.Шошина // Л.:Химия, Ленигр. Отд., 1981. – 423 с.
5. Фоменко Л.А. Кинетика локального электрохимического осаждения меди в узких каналах формообразующих углублений под влиянием ультразвуковой кавитации. Теоретические исследования / Ловцова Л.Г. Серянов Ю.В. // Журнал Вестник Сар.гос.тех.ун - та, Саратов: – 2011 – №4, выпуск 1, – С 86 - 91.

© Л. Г. Ловцова, 2015

УДК 004.042

К.Г. Попов

к.э.н., доцент кафедры информационной безопасности
ИУБП БашГУ

г. Уфа. РФ

Р.Р. Шамсутдинов

студент БашГУ

г. Уфа. РФ

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ, ХРАНИМОЙ НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

В данном исследовании под объектом защиты понимается информация, определяемая в Российском законодательстве как какие - либо сведения независимо от формы их

представления. Конечно, не вся информация, хранящаяся на электронных носителях, должна быть зашифрована. Безопасность информации подразумевает обеспечение безопасности трех главных ее свойств:

- конфиденциальности;
- целостности;
- доступности.

Шифрование информации призвано обеспечивать невозможность ее понимания лицами, не имеющими к ней санкционированного доступа, то есть обеспечивать ее конфиденциальность. Таким образом, объектом защиты в данном контексте является конфиденциальная информация, поскольку нет необходимости, а порой даже запрещено защищать открытую информацию от разглашения.

К конфиденциальной относится следующая информация определенная Указом Президента Российской Федерации от 6 марта 1997 г. N 188 «Об утверждении перечня сведений конфиденциального характера»:

1) Сведения о фактах, событиях и обстоятельствах частной жизни гражданина, позволяющие идентифицировать его личность, за исключением сведений, подлежащих распространению в средствах массовой информации в установленных Федеральными законами случаях.

2) Сведения, составляющие тайну следствия и судопроизводства, сведения о лицах, в отношении которых в соответствии с федеральными законами от 20 апреля 1995 г. N 45 - ФЗ «О государственной защите судей, должностных лиц правоохранительных и контролирующих органов» и от 20 августа 2004 г. N 119 - ФЗ «О государственной защите потерпевших, свидетелей и иных участников уголовного судопроизводства», другими нормативными правовыми актами Российской Федерации принято решение о применении мер государственной защиты, а также сведения о мерах государственной защиты указанных лиц, если законодательством Российской Федерации такие сведения не отнесены к сведениям, составляющим государственную тайну.

3) Служебные сведения, доступ к которым ограничен органами государственной власти в соответствии с Гражданским Кодексом Российской Федерации и федеральными законами.

4) Сведения, связанные с профессиональной деятельностью, доступ к которым ограничен в соответствии с Конституцией Российской Федерации и Федеральными законами.

5) Сведения, связанные с коммерческой деятельностью, доступ к которым ограничен в соответствии с Гражданским Кодексом Российской Федерации и Федеральными законами.

6) Сведения о сущности изобретения, полезной модели или промышленного образца до официальной публикации информации о них.

7) Сведения, содержащиеся в личных делах осужденных, а также сведения о принудительном исполнении судебных актов, актов других органов и должностных лиц, кроме сведений, которые являются общедоступными в соответствии с Федеральным законом от 2 октября 2007 г. N 229 - ФЗ «Об исполнительном производстве»[2].

Таким образом, к конфиденциальной информации относятся персональные данные, коммерческая, профессиональная, служебная тайны, тайна следствия и судопроизводства, информация об объектах патентного права до ее официальной публикации, а также

сведения, содержащиеся в личных делах осужденных, а также сведения о принудительном исполнении судебных актов.

Также к информации ограниченного доступа относится государственная тайна Российской Федерации. Информация, относимая к государственной тайне Российской Федерации, определяется статьей 5 Федерального закона Российской Федерации «О государственной тайне» № 5485 - 1 от 21 июля 1993, а также Указом Президента РФ «Об утверждении перечня сведений, отнесенных к государственной тайне» № 1203 от 30 ноября 1995 года. Согласно Федеральному закону к государственной тайне относится:

Государственную тайну составляют:

1) сведения в военной области [1, ст. 5]:

а) о содержании стратегических и оперативных планов, документов боевого управления по подготовке и проведению операций, стратегическому, оперативному и мобилизационному развертыванию Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов, предусмотренных Федеральным законом «Об обороне», об их боевой и мобилизационной готовности, о создании и об использовании мобилизационных ресурсов;

б) о планах строительства Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск Российской Федерации, о направлениях развития вооружения и военной техники, о содержании и результатах выполнения целевых программ, научно - исследовательских и опытно - конструкторских работ по созданию и модернизации образцов вооружения и военной техники;

в) о разработке, технологии, производстве, об объемах производства, о хранении, об утилизации ядерных боеприпасов, их составных частей, делящихся ядерных материалов, используемых в ядерных боеприпасах, о технических средствах и (или) методах защиты ядерных боеприпасов от несанкционированного применения, а также о ядерных энергетических и специальных физических установках оборонного значения;

г) о тактико - технических характеристиках и возможностях боевого применения образцов вооружения и военной техники, о свойствах, рецептурах или технологиях производства новых видов ракетного топлива или взрывчатых веществ военного назначения;

д) о дислокации, назначении, степени готовности, защищенности режимных и особо важных объектов, об их проектировании, строительстве и эксплуатации, а также об отводе земель, недр и акваторий для этих объектов;

е) о дислокации, действительных наименованиях, об организационной структуре, о вооружении, численности войск и состоянии их боевого обеспечения, а также о военно - политической и (или) оперативной обстановке;

2) сведения в области экономики, науки и техники [1, ст. 5]:

- о содержании планов подготовки Российской Федерации и ее отдельных регионов к возможным военным действиям, о мобилизационных мощностях промышленности по изготовлению и ремонту вооружения и военной техники, об объемах производства, поставок, о запасах стратегических видов сырья и материалов, а также о размещении, фактических размерах и об использовании государственных материальных резервов;

- об использовании инфраструктуры Российской Федерации в целях обеспечения обороноспособности и безопасности государства;

- о силах и средствах гражданской обороны, о дислокации, предназначении и степени защищенности объектов административного управления, о степени обеспечения безопасности населения, о функционировании транспорта и связи в Российской Федерации в целях обеспечения безопасности государства;

- об объемах, о планах (заданиях) государственного оборонного заказа, о выпуске и поставках (в денежном или натуральном выражении) вооружения, военной техники и другой оборонной продукции, о наличии и наращивании мощностей по их выпуску, о связях предприятий по кооперации, о разработчиках или об изготовителях указанных вооружения, военной техники и другой оборонной продукции;

- о достижениях науки и техники, о научно - исследовательских, об опытно - конструкторских, о проектных работах и технологиях, имеющих важное оборонное или экономическое значение, влияющих на безопасность государства;

- о запасах платины, металлов платиновой группы, природных алмазов в Государственном фонде драгоценных металлов и драгоценных камней Российской Федерации, Центральном банке Российской Федерации, а также об объемах запасов в недрах, добычи, производства и потребления стратегических видов полезных ископаемых Российской Федерации (по списку, определяемому Правительством Российской Федерации);

3) сведения в области внешней политики и экономики:

- о внешнеполитической, внешнеэкономической деятельности Российской Федерации, преждевременное распространение которых может нанести ущерб безопасности государства;

- о финансовой политике в отношении иностранных государств (за исключением обобщенных показателей по внешней задолженности), а также о финансовой или денежно - кредитной деятельности, преждевременное распространение которых может нанести ущерб безопасности государства [1, ст. 5];

4) сведения в области разведывательной, контрразведывательной и оперативно - розыскной деятельности, а также в области противодействия терроризму и в области обеспечения безопасности лиц, в отношении которых принято решение о применении мер государственной защиты:

- ✓ о силах, средствах, об источниках, о методах, планах и результатах разведывательной, контрразведывательной, оперативно - розыскной деятельности и деятельности по противодействию терроризму, а также данные о финансировании этой деятельности, если эти данные раскрывают перечисленные сведения;

- ✓ о силах, средствах, об источниках, о методах, планах и результатах деятельности по обеспечению безопасности лиц, в отношении которых принято решение о применении мер государственной защиты, данные о финансировании этой деятельности, если эти данные раскрывают перечисленные сведения, а также отдельные сведения об указанных лицах;

- ✓ о лицах, сотрудничающих или сотрудничавших на конфиденциальной основе с органами, осуществляющими разведывательную, контрразведывательную и оперативно - розыскную деятельность;

- ✓ об организации, о силах, средствах и методах обеспечения безопасности объектов государственной охраны, а также данные о финансировании этой деятельности, если эти данные раскрывают перечисленные сведения;

✓ о системе президентской, правительственной, шифрованной, в том числе кодированной и засекреченной связи, о шифрах, о разработке, об изготовлении шифров и обеспечении ими, о методах и средствах анализа шифровальных средств и средств специальной защиты, об информационно - аналитических системах специального назначения;

✓ о методах и средствах защиты секретной информации;

✓ об организации и о фактическом состоянии защиты государственной тайны;

✓ о защите Государственной границы Российской Федерации, исключительной экономической зоны и континентального шельфа Российской Федерации;

✓ о расходах федерального бюджета, связанных с обеспечением обороны, безопасности государства и правоохранительной деятельности в Российской Федерации;

✓ о подготовке кадров, раскрывающие мероприятия, проводимые в целях обеспечения безопасности государства;

✓ о мерах по обеспечению защищенности критически важных объектов и потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации от террористических актов;

✓ о результатах финансового мониторинга в отношении организаций и физических лиц, полученных в связи с проверкой их возможной причастности к террористической деятельности [1, ст. 5].

Криптографическая защита информации определяется ГОСТ Р 50922 - 2006 как защита информации с помощью ее криптографического преобразования» [3, с. 1] – шифрования. Под шифрованием информации понимается процесс преобразования исходного текста (файла) с помощью определенного алгоритма в так называемый шифротекст [4, с. 99] (зашифрованный файл), по которому невозможно определить содержание исходного сообщения (файла), не зная способа, которым оно было зашифровано и определенных данных – ключей для корректного определения исходного сообщения (файла).

Для шифрования информации, относимой к государственной тайне в РФ, могут быть использованы только сертифицированные по определенному уровню средства защиты информации (далее – СЗИ), такие как, к примеру, Аппаратно - программные криптографические комплексы М - 590 («Криптон – ПШД / IDE), М - 575 («Криптон – ПШД / SATA») и М - 623 («Криптон – Интеграл»). Данные комплексы предназначены для защиты информации (в том числе сведений, составляющих государственную тайну) на дисках компьютера и защиты от несанкционированного доступа (далее – НСД) ресурсов компьютера. В состав комплексов входит модуль проходного аппаратного шифратора серии «Криптон» и подсистема защиты от несанкционированного доступа на базе аппаратно - программного модуля доверенной загрузки «Криптон - Замок».

Остановимся подробнее на конфиденциальной информации. Для ее защиты на электронных носителях рекомендуется к использованию СЗИ от НСД «SecretDisk», не просто защищающее информацию, но и скрывающее сам факт ее присутствия. Данное СЗИ зашифровывает и скрывает логические диски, виртуальные диски, обеспечивает защиту системы. Обеспечивает защиту также съемных носителей путем их шифрования.

Рассмотрим подробнее сертифицированную версию «SecretDisk 4». «Сертифицированная версия "SecretDisk 4" может использоваться в информационных системах персональных данных (ИСПДн) до 2 класса включительно и для создания

автоматизированных систем до класса защищенности 1Г включительно. Комплектуется сертифицированным ключом "eToken PRO (Java)"» [5].

Рассматриваемое СЗИ обеспечивает ЗИ от НСД, защиту системного раздела диска, прозрачную работу для пользователя, использует двухфакторную аутентификацию с помощью электронного сертифицированного ключа «eToken», поддерживает ОС Windows XP, Windows Vista и Windows 7 (32 / 64 - бит), а также любые PC / SC - совместимые карт - ридеры при использовании смарт - карт. «SecretDisk 4» представляет собой версию 4.3.2, сертифицированную ФСТЭК России на соответствие требованиям задания по безопасности 46538383.42 5000.002 - 043Б с уровнем доверия ОУД1+ (усиленный) по Общим критериям, соответствует закону по защите персональных данных [5].

Протестируем работу «SecretDisk». На официальном сайте производителя было получено программное обеспечение «SecretDisk», при попытке его установки появилось окно, сообщающее об отсутствии на персональном компьютере (далее – ПК) драйвера поддержки смарт - карт, изображенного на рисунке 1, после чего на официальном сайте был получен «eTokenPKIClient» –программное обеспечение (далее – ПО), предназначенное для работы с «eToken», данное ПО было установлено и запущено. После запуска установленного ПО к USB - порту ПК был подключен «eToken», ПО запросило пароль от токена, окно запроса изображено на рисунке 2. Вводим пароль, установленный производителем по умолчанию – «1234567890» без кавычек. После ввода пароля и авторизации было обнаружено, что мы не можем управлять токеном с правами администратора, для этого необходимо произвести его инициализацию, что и было сделано. Перед инициализацией программа предложила нам настроить параметры инициализации, окно настроек изображено на рисунке 3.



Рисунок 1 – Окно сообщения об отсутствии на ЭВМ драйвера поддержки смарт – карт

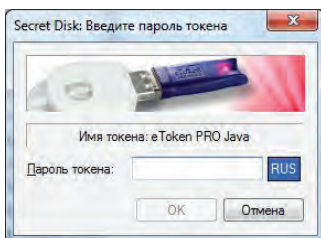


Рисунок 2 – Окно запроса пароля токена

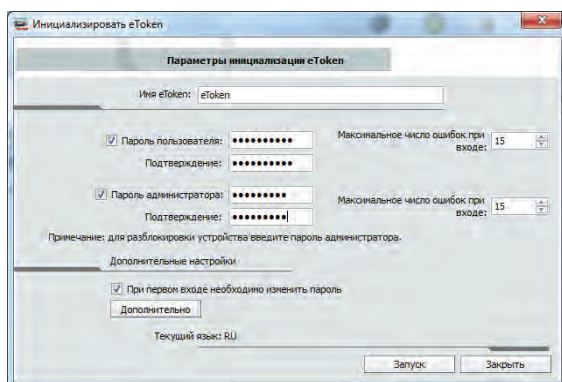


Рисунок 3 – Окно установки параметров инициализации токена

После успешной инициализации были установлены пароли для администратора и пользователя токена, обратим внимание, что настроенная по умолчанию политика для паролей запретила нам устанавливать пароли, состоящие только из цифр. Политика паролей настраивается при входе на токен с правами администратора. В «eTokenPKIClient» можно сменить пароль, окно смены пароля изображено на рисунке 4. После, нами было установлено ПО «SecretDisk», запущено. Программа предложила нам зарегистрировать нового пользователя и выбрать для него существующий сертификат, либо создать новый, как представлено на рисунке 5. При попытке создать сертификат пользователя, программа проверила токен и сообщила, что на нем отсутствует пользовательская лицензия. Мы обратились в техническую поддержку производителя, в ответ на наш запрос нам была выслана утилита для восстановления лицензии. Запущенная утилита, обнаружив подключенный токен, запросила пароль токена, затем произвела восстановление лицензии пользователя. Окно данной утилиты представлено на рисунке 6.



Рисунок 4 – Окно смены пароля на «eToken»

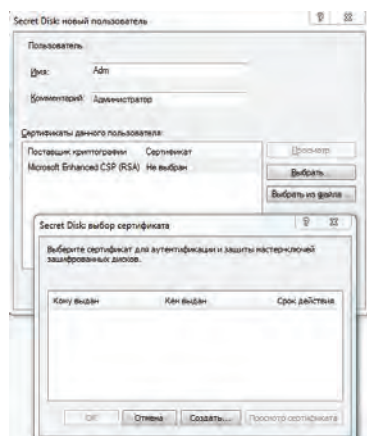


Рисунок 5 – Создание нового пользователя «SecretDisk»

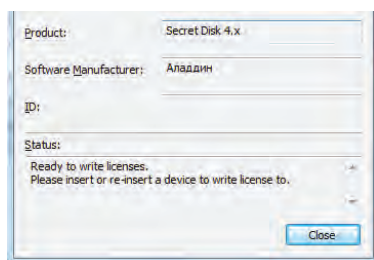


Рисунок 6– Окно утилиты восстановления лицензии токена

После успешного восстановления лицензии был зарегистрирован пользователь «SecretDisk» после заполнения формы, изображенной на рисунке 7, сохранении резервной копии сертификата. Окно данной процедуры представлено на рисунке 8, окно выбора токена на рисунке –9.

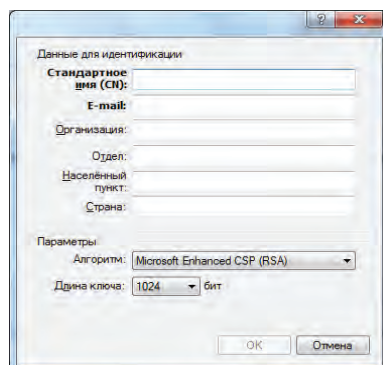


Рисунок 7 – Форма регистрации нового пользователя

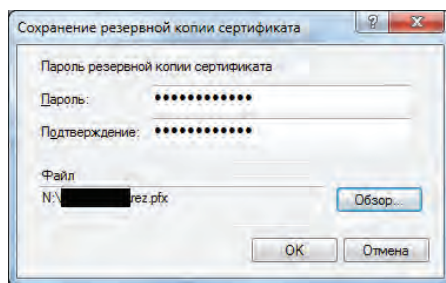


Рисунок 8 – Окно сохранения резервной копии сертификата

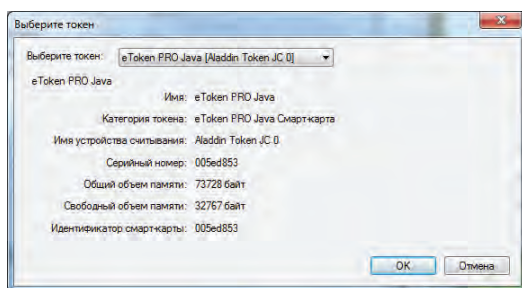


Рисунок 9 – Окно выбора токена регистрируемого пользователя

После регистрации пользователя и авторизации в «SecretDisk» перед нами появляется окно, отображающее все подключенные локальные диски, а также съемные носители информации, как и отображено на рисунке 10. Подключили USB - диск, он сразу отобразился в главном окне СЗИ, подчеркнут на рисунке 11, нажатием кнопки «создать» был создан и зашифрован виртуальный диск по алгоритму «AES» 256 бит(для этого был загружен и установлен пакет «SecretDisk CryptoPack»), окно создания диска отображено на рисунке 12. В настройках ПО по умолчанию указано завершение сеанса после извлечения токена и отключение зашифрованных дисков. В «Explorer.exe» стал отображаться созданный нами виртуальный диск, на него был помещен текстовый файл, затем токен был отключен, виртуальный диск, открытый в «Explorer.exe» сразу же закрылся.

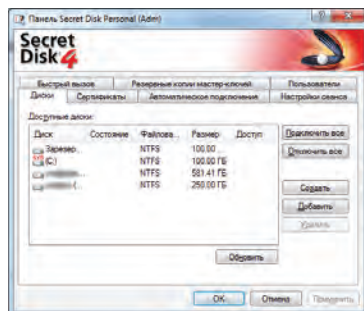


Рисунок 10 – Главное окно «SecretDisk4»

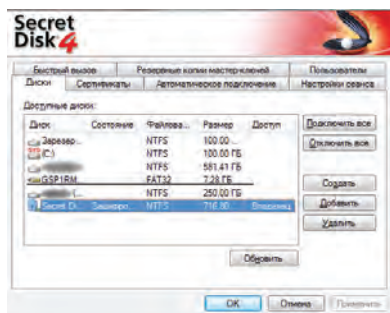


Рисунок 11 – Зашифрованный виртуальный диск и подключенный USB – диск

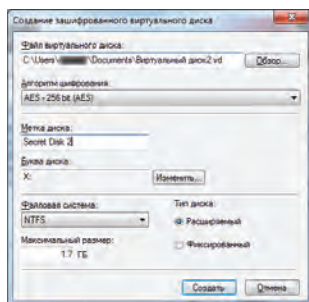


Рисунок 12 – Создание и шифрование виртуального диска

После извлечения токена окно СЗИ также было автоматически закрыто, из раздела «Мой компьютер» проводника Windows исчез рассматриваемый виртуальный диск. Токен вновь был подключен в ПК, после чего ПК запросил пароль от токена. Пароль был введен, после чего появилось сообщение о подключении скрытых дисков, представленное на рисунке 13. После успешного подключения в окне проводника Windows стал отображаться созданный нами виртуальный диск, изображенный на рисунке 14.

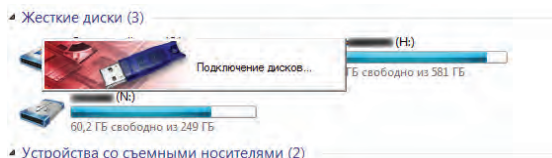


Рисунок 13 – Подключение дисков

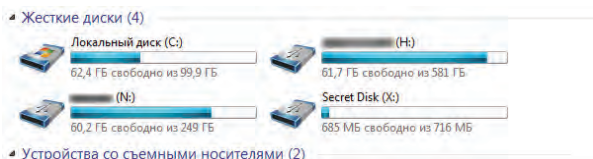


Рисунок 14 – Подключенный виртуальный диск

Текстовый файл, размещенный на виртуальном диске, открылся корректно. Также была проверена корректность работы сложных приложений с зашифрованного диска (игра для ПК размером в 2,7 ГБ), для этого был создан виртуальный диск объемом в 30 ГБ. Приложение работает идеально.

Далее была изменена метка системного диска на «963», произведена установка его защиты, в процессе которой появился запрос подтверждения перезагрузки, представленный на рисунке 15, после чего ПК был автоматически перезагружен, затем появилось окно, изображенное на рисунке 16, спустя 5 минут началась установка защиты диска, процесс которой отображен на рисунке 17.

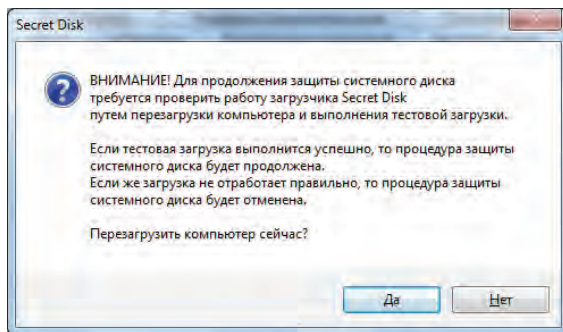


Рисунок 15 – Запрос подтверждения перезагрузки ПК перед установкой защиты системного раздела диска

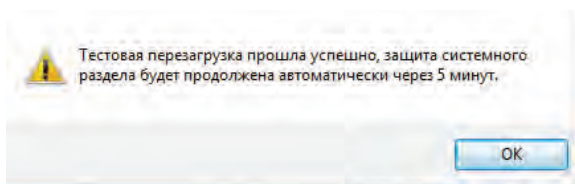


Рисунок 16 – Подтверждение успеха тестовой перезагрузки ПК

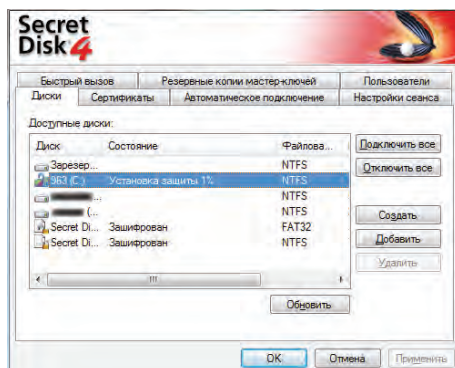
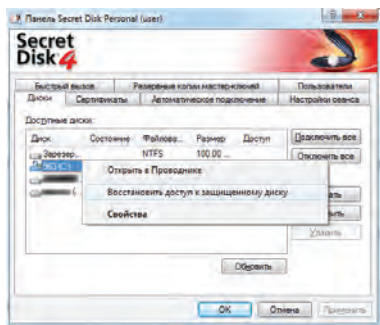


Рисунок 17 – Установка защиты системного раздела диска

После установки защиты диска ПО предложило нам сохранить мастер - ключ системного диска, изображенный на рисунке 18, он необходим для снятия защиты диска, либо включения компьютера в случае утери токена. ПК был перезагружен, до загрузки ОС ПК запросил токен, токен был подключен, после чего последовал запрос пароля токена, изображенный на рисунке 19, далее ОС была загружена в стандартном режиме.

Рисунок 18 – Мастер - ключ защищенного системного раздела диска

Рисунок 19 – Запрос пароля токена при включении ПК



Мы попытались восстановить доступ к защищенному системному диску, ПО запросило мастер - ключ, мастер - ключ был введен, доступ получен (рисунок 21)

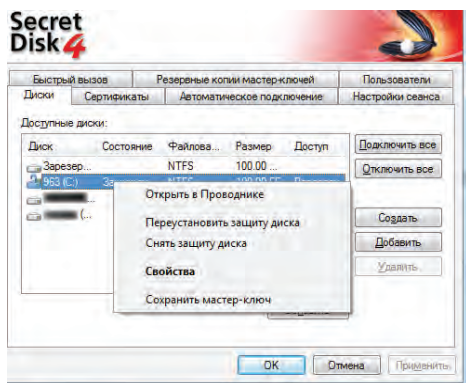


Рисунок 21 – Контекстное меню защищенного системного диска, представляемое пользователю ПК, не имевшему доступа к его администрированию, но его восстановившего вводом мастер – ключа

Далее сеанс второго пользователя был завершен, мы авторизовались как первый пользователь, и произвели попытку шифрования логического диска объемом в 581 Гб. Был выбран алгоритм «AES» 128 бит. Шифрование заняло довольно продолжительное время. После успешного шифрования логический диск работал корректно, данные сохранились, далее было произведено дешифрование данного диска, процесс которого отображен на рисунке 22. Диск был расшифрован корректно, все данные сохранены.

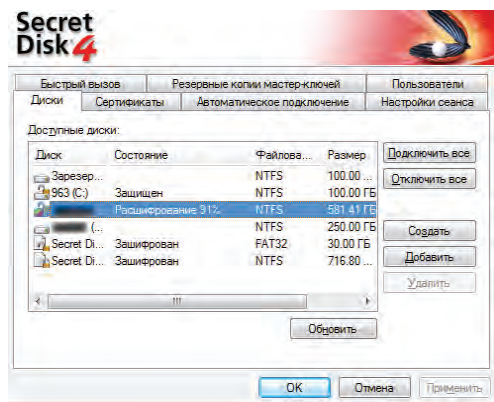


Рисунок 22 – Дешифрование логического диска

После шифрования съемных носителей они не отображаются для неавторизованных пользователей или пользователей других ЭВМ или отображаются как требующие форматирования

Таким образом, СЗИ «SecretDisk 4» обеспечивает надежную ЗИ от НСД путем не только ее шифрования, но и сокрытия самого факта ее существования как на логических дисках, так и на всех поддерживаемых видах съемных носителей.

Список использованной литературы:

1. Закон РФ от 21.07.1993 N 5485 - 1 (ред. от 21.12.2013) < О государственной тайне > [Текст] : ФЗ от 21.07.1993 №131 - ФЗ [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс : [web - сайт]. <https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2481/b6a297f676cd64a5eea867c45fb375fcb1dee3a5/> (26.11.2015);
2. Об утверждении перечня сведений конфиденциального характера : Указ Президента Российской Федерации от 6 марта 1997 года № 188 : официальный текст [Электронный ресурс] // Гарант : [web - сайт]. <<http://base.garant.ru/10200083/>> (26.11.2015);
3. Защита информации. Основные требования и определения : ГОСТ Р 50922 - 2006 : [Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. № 373 - ст] : официальное издание. – Москва :Стандартинформ, 2008. – С. 1;
4. Шаньгин В. Ф. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей : уч. пособие // Основные понятия криптографической защиты информации. – М.: ИД < ФОРУМ >:ИНФРА - М, 2008. – Гл. 5. – с. 99;
5. Сертифицированная версия <SecretDisk 4 >[Электронный ресурс] // Аладдин : [web - сайт] <http://www.aladdin-rd.ru/catalog/secret_disk/personal/certified/> (19.04.2015).

© К. Г. Попов, Р. Р. Шамсутдинов, 2015

УДК 004.451

К.Г. Попов

к.э.н., доцент кафедры информационной безопасности ИУБП БашГУ
г. Уфа. РФ

Р.Р. Шамсутдинов

студент БашГУ
г. Уфа. РФ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНО - АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДОВЕРЕННУЮ ЗАГРУЗКУ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время разработчики предлагают организациям, заинтересованным в обеспечении должного уровня информационной безопасности, целый ряд программно - аппаратных комплексов, обеспечивающих доверенную загрузку операционной системы. В связи с этим, в данной работе нами сделаны основные подходы к сравнительному анализу некоторых указанных программно - аппаратных комплексов.

В первую очередь, рассмотрим понятие доверенной загрузки. Доверенной загрузкой называют загрузку различных *операционных систем* (далее – *ОС*), выполняемую только

после успешного завершения специальных процедур, таких как проверка целостности программных и технических средств *персонального компьютера* (далее – *ПК*), *идентификация и аутентификация* (далее – *ИА*) пользователя, и только с заранее определенных постоянных носителей, таких как, к примеру, жесткие диски [4].

Рассмотрим следующие *программно - аппаратные комплексы* (далее – *ПАК*) защиты информации (далее – *ЗИ*) от *несанкционированного доступа* (далее – *НСД*), содержащие в своем составе *аппаратные модули доверенной загрузки* (далее – *АМДЗ*):

- 1) «Аккорд - win32»;
- 2) «Соболь»;
- 3) «Криптон - цит».

Рассмотрим возможности *ПАК Аккорд - Win32*, к ним относятся:

- ✓ Защита от НСД к ЭВМ;
- ✓ ИА пользователей до загрузки ОС с последующей передачей результатов успешной идентификации и аутентификации в ОС;
- ✓ Аппаратный контроль целостности системных файлов и критичных разделов реестра;
- ✓ Доверенная загрузка ОС;
- ✓ Контроль целостности программ и данных, их защита от несанкционированных модификаций;
- ✓ Создание индивидуальной для каждого пользователя изолированной рабочей программной среды;
- ✓ Запрет запуска неразрешенных программ;
- ✓ Дискреционный контроль доступа;
- ✓ Мандатный контроль доступа;
- ✓ Автоматическое ведение протокола регистрируемых событий в энергонезависимой памяти аппаратной части комплекса;
- ✓ Усиленная аутентификация терминальных станций с помощью контроллера Аккорд или ПСКЗИ ШИПКА (*ПСКЗИ* – Персональное средство криптографической защиты информации [9]; *ШИПКА* – Шифрование, Идентификация, Подпись, Коды аутентификации [12]), основное предназначение которых – именно выполнение криптографических преобразований: генерация ключей, вычисление хеш - функции, шифрование, выработка и проверка *электронной цифровой подписи* (далее – *ЭЦП*) [12];
- ✓ ИА пользователей, подключающихся к терминальному серверу (с использованием ТМ - идентификатора или ПСКЗИ ШИПКА);
- ✓ Опциональная автоматическая идентификация в системе Windows NT+ и на терминальном сервере пользователей, аутентифицированных защитными механизмами контроллера АМДЗ;
- ✓ Управление терминальными сессиями;
- ✓ Контроль печати на принтерах, подключенных как к терминальным серверам, так и к пользовательским терминалам, который позволяет протоколировать вывод документов на печать и маркировать эти документы.
- ✓ Контроль доступа к USB устройствам
- ✓ Ведение подробного журнала действий пользователя на терминальном сервере
- ✓ максимальное количество уровней доступа – 16

✓ Возможно использование вместо пароля (или одновременно с паролем) биометрической аутентификации пользователя по сосудистому руслу ладони и отпечатку пальца [8]

Рассматриваемый комплекс соответствует 3 классу защищенности от НСД, 2 уровню контроля отсутствия *недекларированных возможностей* (далее – НДВ), применим для построения систем ЗИ от НСД по классу защищенности 1Д *автоматизированной системы* (далее – АС) от НСД к информации; для использования в качестве средства ИА пользователей, контроля целостности программной и аппаратной среды персональных ЭВМ до класса защищенности 1Б включительно АС от НСД к информации. АМДЗ имеет сертификат соответствия классу 3Б модулей доверенной загрузки ЭВМ, выданный ФСБ РФ, разрешена защита сведений, не составляющих государственную тайну. Стоимость ПАК «Аккорд - win32» – 18 235 руб. (из них АМДЗ – 15 630 руб.)

ПАК «Соболь» – Сертифицированный *аппаратно - программный модуль доверенной загрузки* (далее – АПМДЗ) созданный для защиты компьютеров от НСД, обеспечения доверенной загрузки и создания доверенной программной среды для повышения класса защиты СКЗИ. АПМДЗ Соболь осуществляет [10]:

- ИА пользователей до загрузки ОС при помощи ключей iButton, iKey2032, eToken, Rutoken и др.

- регистрацию попыток доступа в системном журнале, записи которого хранятся в специальной энергонезависимой памяти

- контроль целостности аппаратной конфигурации компьютера, файлов ОС и реестра Windows, прикладных программ

- доверенную загрузку, запрещает загрузку ОС с внешних носителей.

- генерацию надежных ключей шифрования при помощи сертифицированного *аппаратного датчика случайных чисел* (далее – ДСЧ)

- блокировку доступа к компьютеру при обнаружении попытки отключения электронного замка «Соболь» при помощи дополнительного модуля сторожевого таймера

- программную инициализацию без вскрытия системного блока

- контролирует неизменность конфигурации компьютера – PCI - устройств, ACPI, SMBIOS и оперативной памяти [10].

- Поддерживает файловые системы: NTFS; FAT 32; FAT 16; UFS; UFS2; EXT3; EXT2; EXT4.

«Соболь» сертифицирован по 2 уровню отсутствия НДВ, разрешён к использованию в АС до класса 1Б включительно и соответствует требованиям к аппаратно - программным модулям доверенной загрузки ЭВМ класса 1Б. Пак «Соболь» 11 580 руб.

В ПАК КРИПТОН - ЦИТ осуществляет:

- единые и одноразовые процессы идентификации и аутентификации для пользователя, с формированием профиля прав доступа;

- Контроль доступа к ресурсам компьютера;

- Контроль целостности операционной среды методом контрольного суммирования;

- Мандатный и дискреционный принцип разграничения доступа к ресурсам ОС;

- Интегрированную настройку и описание пользователей, прав доступа пользователей к ресурсам;

- Автоматическую блокировку доступа к ресурсам персонального компьютера во время отсутствия пользователя;
- Возможность трассировки обращений к ресурсам программного обеспечения в специальном отладочном режиме;
- Разграничение доступа к процедурам (программам);
- Обеспечение единого интерфейса пользователя для работы с процедурами (программами), одновременно выполняющего разграничение доступа к процедурам для каждой категории пользователя;
- Ролевую модель разграничения доступа к процедурам (программам);
- Поддержку многошаговых процедур с возможностью наследования полномочий и без него.
- Дополнительное разграничение доступа к USB - устройствам, регистрация данных при печати файлов на принтере
- Гибкую систему протоколирования и аудит событий в системе защиты информации;
- Поддержку двух журналов аудита пользователя – учета событий и обращений к ресурсам. Кроме того, ведется журнал печати;
- Контроль отладочных регистров;
- Динамический контроль целостности;
- Гарантированную очистку оперативной памяти [11].

Данный ПАК содержит в своем составе АПИМДЗ «КРИПТОН - ЗАМОК / Е», который имеет сертификат соответствия классу 1Б модулей доверенной загрузки, выданный ФСБ РФ, может использоваться при работе с гос. тайной, имеет в своем составе аппаратный ДСЧ, поддерживает файловые системы: FAT12, FAT16, FAT32, NTFS, EXT2, EXT3 [6] и осуществляет:

- идентификацию пользователя до запуска BIOS компьютера; двухфакторную аутентификацию пользователя;
- блокировку ЭВМ при НСД;
- создание нескольких профилей защиты; надежное разграничение ресурсов компьютера;
- накопление и ведение электронного журнала событий (в собственной энергонезависимой памяти);
- подсчет эталонных значений контрольных сумм объектов и проверка текущих значений контрольных сумм;
- интеграцию в другие системы безопасности (сигнализацию, пожарную охрану и пр.);
- организацию бездисковых рабочих мест на основе встроенного Flash - диска;
- защиту компьютера от нештатного электрического воздействия на тракт ввода ключевой информации;
- инициализацию устройств шифрования (сетевых шифраторов, абонентских шифраторов, шифраторов жестких дисков серии криптон);
- управление загрузкой операционной системы с жесткого диска;
- контроль целостности загружаемой программной среды;
- аппаратную защиту от несанкционированной загрузки операционной системы с гибкого диска, CD - ROM, DVD - ROM, USB устройств.

Сравним основные характеристики и возможности рассматриваемых ПАК, сведем полученные данные в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение ПАК «Аккорд - win32», «Соболь» и «Криптон-цит»

Наименование характеристики	ПАК «Аккорд - win32» [7]	ПАК «Соболь» [10]	ПАК «Криптон-цит» [11]
Идентификатор	USB - токены, USB - ключи, Смарт - карты, ПСКЗИ ШИПКА Touch memory	iButton, iKey2032, eToken, Rutoken и др.	Rutoken
Файловые системы	FAT12, FAT16, FAT32, NTFS, HPFS, Ext2, Ext3, Ext4, ReiserFS, QNX4, MINIX	NTFS; FAT 32; FAT 16; UFS; UFS2; EXT3; EXT2; EXT4	FAT12, FAT16, FAT32, NTFS, EXT2, EXT3
ОС	MS DOS, Windows, QNX, OS / 2, UNIX, LINUX, BSD, vSphere и др.	Windows; FreeBSD; MCBC 3.0; Альт/ЛинуксСНП 6.0.0; Astra Linux Special Edition «Смоленск»; OC CentOS 6.2; Debian 6.0.3; Mandriva ROSA Desktop; и др.	под любые ОС с соответствующей файловой системой
Идентификация и аутентификация	до загрузки ОС, после загрузки BIOS	нет информации	до запуска BIOS
Контроль целостности	системных файлов, критичных разделов реестра, программ и данных	аппаратной конфигурации компьютера, файлов ОС, реестра, прикладных программ	Программной среды
Ведение журнала	журнала событий	журнала событий	журналы событий, обращений к ресурсам, печати
Доверенная загрузка ОС	да	да	да
Тип разграничения доступа	Мандатный и дискреционный	нет информации	Мандатный и дискреционный
Аппаратный ДСЧ	есть	есть	есть
Защищенность	3 класс	-	3 класс

СВТ от НСД			
Уровень контроля отсутствия НДС	2	2	2
Класс защищенности АС	1Д (для использования в качестве средства идентификации и аутентификации пользователей, контроля целостности программной и аппаратной среды персональных ЭВМ до класса защищенности 1Б включительно)	1Б	-
Класс модулей доверенной загрузки ЭВМ	3Б	1Б	1Б
Класс СЗИ от НСД в АС	-	-	КАИ - 1.02
Стоимость (руб.)	18 235 (из них АМДЗ – 15 630)	11 580	17430 (из них АМДЗ – 13700)

Сравнивая данные ПАК, отметим явное преимущество «Соболь» ввиду его минимальной стоимости и сертификации по наивысшим (среди рассматриваемых СЗИ) классам модулей доверенной загрузки и защищенности АС от НСД, уровню контроля НДС.

Рассмотрим подробнее сертификаты соответствия рекомендуемого к использованию ПАК «Соболь». Сертификат соответствия № 1967 выданный ФСТЭК РФ 7 декабря 2009 г. с продленным сроком действия до 7 декабря 2015 г. удостоверяет, что рассматриваемый ПАК соответствует требованиям руководящего документа «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей» по 2 уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей и может использоваться при создании АС до класса защищенности 1Б включительно [2]. Напомним, что «второй уровень контроля достаточен для программного обеспечения, используемого при защите информации с грифом "Совершенно секретно"» [1, с. 2], класс защищенности 1Б – достаточен для защиты многопользовательских АС, обрабатывающих информацию с грифом «Совершенно секретно».

Сертификат соответствия № СФ / 527 - 2623 выданный ФСБ РФ 30 июня 2015 в системе сертификации РОСС RU.0001.030001 удостоверяет, что рассматриваемый ПАК «Соболь» соответствует требованиям ФСБ России к аппаратно - программным модулям доверенной

загрузки ЭВМ класса 1Б и может использоваться для защиты от НСД к информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну [3]

Рассмотрим подробнее работу АМДЗ на примере «Аккорд - 5МХ» rev. 6 с ТМ - идентификатором.

«Аккорд - АМДЗ» начинает работу до загрузки ОС, но после выполнения штатного BIOS (англ. Basic input / output system — «базовая система ввода - вывода» [13]).

Рассмотрим подробнее процедуру ИА, контроль целостности, очистку *базы данных* (далее – БД) контроллера, установку драйвера, обновление ПО контроллера.

Идентификация и аутентификация. При включении персонального компьютера после выполнения штатного BIOS запускается АМДЗ, на экран выводится информация, отображенная на рисунке 1

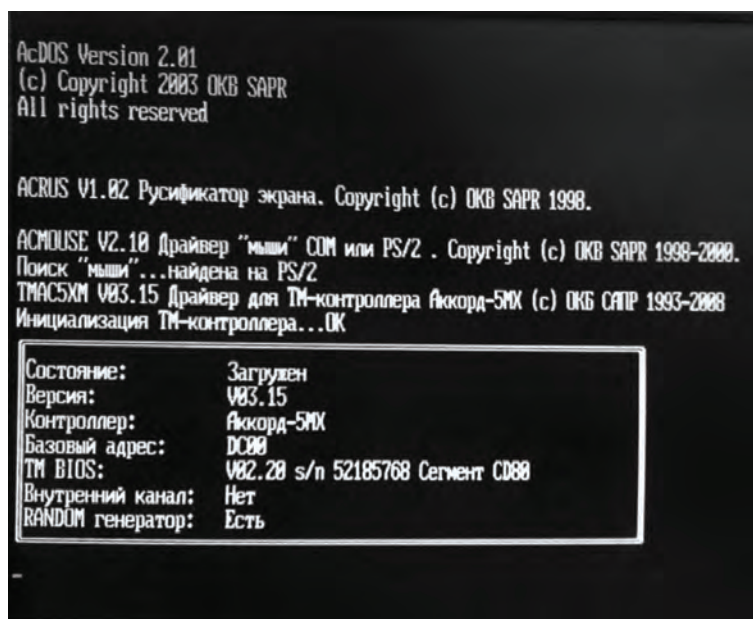


Рисунок 1 – Запуск АМДЗ

Здесь мы видим версии программного обеспечения (далее – ПО) контроллера, его серийный номер – 52185768, видим, что обнаружен ТМ - контроллер. Следом ПК запрашивает идентификатор, после предъявления идентификатора запрашивается пароль.

В процессе идентификации, при предъявлении некорректного идентификатора система никак на него не реагирует, продолжает обратный отсчет, после завершения обратного отсчета, появляется окно с надписью «Таймаут», Такое же окно появляется, если пользователь «не успел» ввести пароль. Перезагружаем ПК, предъявляем корректный идентификатор, вводим некорректный пароль, ПК отказывает в доступе. По умолчанию установлена возможность 3 попыток авторизации.

После успешных ИА появляется меню, изображенное на рисунке 2.

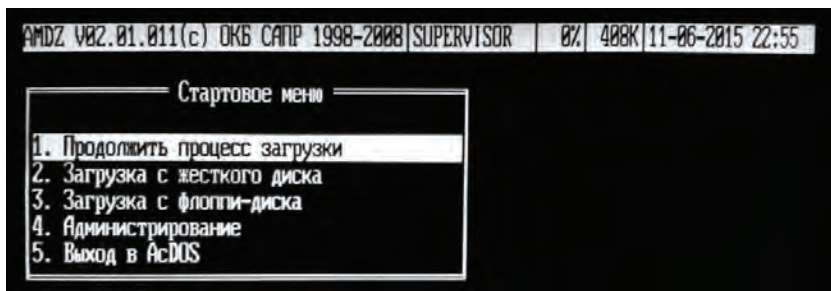


Рисунок 2 – Стартовое меню АМДЗ «Аккорд - 5МХ» rev. 6 с ПО V02.01.011

Выбираем пункт «Администрирование», открывается меню администрирования АМДЗ, отображенное на рисунке 3.

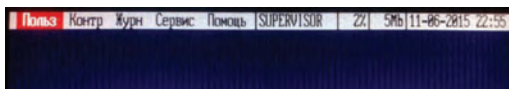


Рисунок 3 – Меню администрирования АМДЗ «Аккорд - 5МХ» rev. 6

В разделе «Польз» осуществляется регистрация, блокирование, удаление и иные операции с учетными записями пользователей, в разделе «Контр» осуществляется настройка контроля целостности файлов, реестра, устройств. Раздел «Журн» содержит системный журнал, «Сервис» – настройки таймаута ИА и т.п.

Рассмотрим подробно работу контроля целостности файлов. Для этого создадим папку, в нее поместим:

- 1) три текстовых файла в формате «txt» и еще три – в формате «docx», в дальнейшем при тестировании контроля целостности мы будем их редактировать;
- 2) по одному файлу рассмотренных форматов, на которых будет смоделировано несанкционированное ознакомление с их содержимым;
- 3) один файл, который мы в последующем переместим в другой каталог.

Для удобства назовем файлы таким образом, чтобы по их названию легко можно было сориентироваться, какому виду воздействия они подвергались, содержимое файлов сделаем одинаковым. Полученная папка представлена на рисунке 4.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
отредактирован_1.docx	11.06.2015 22:47	Документ Micros...	15 КБ
отредактирован_1.txt	11.06.2015 22:46	Текстовый докум...	1 КБ
отредактирован_2.docx	11.06.2015 22:47	Документ Micros...	15 КБ
отредактирован_2.txt	11.06.2015 22:46	Текстовый докум...	1 КБ
отредактирован_3.docx	11.06.2015 22:47	Документ Micros...	15 КБ
отредактирован_3.txt	11.06.2015 22:46	Текстовый докум...	1 КБ
перемещен.txt	11.06.2015 22:46	Текстовый докум...	1 КБ
просмотрен.docx	11.06.2015 22:47	Документ Micros...	15 КБ
просмотрен.txt	11.06.2015 22:46	Текстовый докум...	1 КБ

Рисунок 4 – Содержимое папки, на которой проводится тест работы контроля целостности АМДЗ «Аккорд - 5МХ»

Перезагружаем ПК, в меню АМДЗ, изображенном на рисунке 2 выбираем пункт «Администрирование», в меню администрирования (рисунок 3) выбираем подменю «КОНТР», далее – файлы, открывается древо файлов ПК, выбираем в нем созданную нами папку, открываем, отмечаем созданные файлы, для этого выбираем его курсором а нажимаем «Insert», после того как выбраны все необходимые файлы, нажимаем клавишу «F2» для сохранения настроек. Загружаем ОС, файл «перемещен» перемещаем в любой другой каталог, файлы, предназначенные для просмотра – открываем в соответствующих приложениях, не вносим никаких изменений, закрываем их. Затем открываем в соответствующих приложениях файлы, предназначенные для редактирования, внутри каждой пары файлов «*.txt*» и «*.docx*» вносим идентичные изменения, но для каждой следующей пары изменения должны отличаться, сохраняем, закрываем. Полученный результат продемонстрирован на рисунке 5

Рисунок 5 – содержимое тестовой папки после смоделированных НСВ к файлам

Перезагружаем ПК, проходим процедуры ИА, ПК выводит список ошибок, представленный на рисунке 6, анализируя который можно обнаружить наличие НСД или *несанкционированного воздействия* (далее – *НСВ*) на файлы и тип НСВ, к примеру, ошибка «NFile» свидетельствует об отсутствии файла в назначенном каталоге, определим, что значат другие выявленные ошибки. Проанализируем «STaH», где S – size, T – time, a – attributes, H – hash - function, размер, время, атрибуты, хэш - функция соответственно. Заглавная буква свидетельствует о наличии ошибки, строчная – об её отсутствии.

Рисунок 6 – полученный список ошибок

Таким образом, у каждого отредактированного файла, независимо от содержания внесенных изменений или расширения файла изменились его хэш - функция, размер и время последнего изменения, что свидетельствует о несанкционированном изменении файла. Для каждого просмотренного файла изменились значения хэш - функций, и не

изменились ни время последнего редактирования, ни атрибуты, ни размер, что свидетельствует о несанкционированных ознакомлениях с содержимыми файлов. Откроем системный журнал, содержимое которого представлено на рисунке 7, видим, что в нем отображены все выявленные ошибки, а также информацию о пользователе после, аутентификации которого обнаружены ошибки, а также всех пользователей авторизовавшихся до появления ошибки контроля целостности.

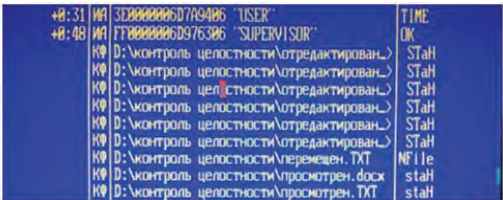


Рисунок 7 – Системный журнал

Контроль целостности также можно установить на всю папку. Более того, можно настроить осуществление как контроля НСВ ко всем вложенным файлам, так и только контроля наличия вложенных файлов. Также существует возможность задать контроль только файлов с определенным расширением. Для установки контроля целостности папки необходимо в настройках контроля доступа выбрать курсором данную папку, нажать клавишу «Insert», в появившемся окне, изображенном на рисунке 8 задать необходимые параметры.

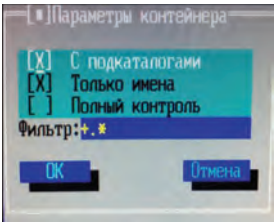


Рисунок 8 – Параметры контроля целостности папки

Установим контроль наличия всех вложенных файлов. Предварительно сняв контроль целостности со всех файлов кроме двух текстовых предназначенных для редактирования и двух – для просмотра. Комбинацией клавиш «Alt+U» обновим сведения о контролируемых файлах, полученный результат представлен на рисунке 9.

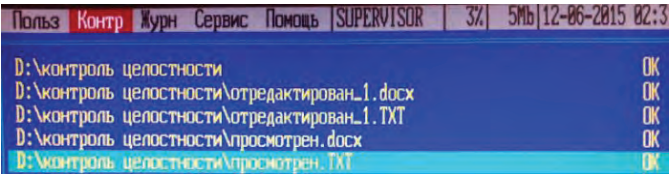


Рисунок 9 – Результат обновления данных о контролируемых файлах

Загружаем ОС, удаляем файлы, снятые с контроля целостности, вносим изменения в один из текстовых файлов, предназначенных для редактирования, сохраняем их. Перезагружаем ПК, получаем ошибки, изображенные на рисунке 10.

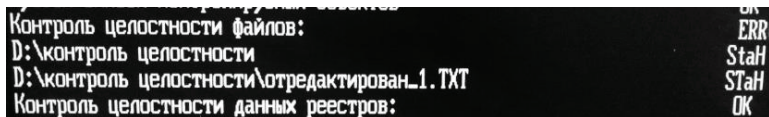


Рисунок 10 – Ошибки контроля целостности файлов и каталога

Заметим, что ввиду редактирования файла изменились его размер, время последнего изменения, значение его хэш - функции, из - за отсутствия некоторых файлов в контролируемой папке изменился ее размер, также изменилось значение ее хэш - функции.

При работе с АМДЗ зачастую появляется необходимость сброса всех настроек модуля и форматирование БД, содержащей сведения о пользователях, выполняемом контроле целостности программно - аппаратной среды, системный журнал и т.д. Также нередки случаи, когда прохождение процедур ИА невозможно, к примеру, если утерян или поврежден идентификатор администратора, либо забыт соответствующий пароль. Данная ситуация была смоделирована на практике: был подключен АМДЗ к персональному компьютеру, затем зарегистрирован идентификатор администратора, следом произведена перезагрузка ПК. После выполнения BIOS компьютера в работу включился АМДЗ, который запросил идентификатор, по условию эксперимента предъявить идентификатор мы не можем, по истечении заданного промежутка времени в 20 секунд АМДЗ запретил доступ к ПК.

В таком случае следует выполнить аппаратную очистку БД. Для выполнения данной процедуры был взят USB - накопитель, который при помощи программы «Rufus - 2.2» был преобразован в загрузочный диск MSDOS. На официальном сайте производителя модуля «ОКБ САПР» по ссылке «[www.accord.ru / update.html?id=5#dop _ ро](http://www.accord.ru/update.html?id=5#dop_ro)» был получен универсальный комплект программного обеспечения (ПО) очистки БД для рассматриваемого контроллера, разархивирован и записан на указанный USB - накопитель. Затем контроллер АМДЗ был переведен в технологический режим (ПК выключен, из него извлечен контроллер АМДЗ, с которого сняты металлическая пластина, закрепляющая микросхему в корпусе системного блока, и джампер технологического режима, отмеченный на рисунке 11, затем АМДЗ был вновь подключен к ПК).

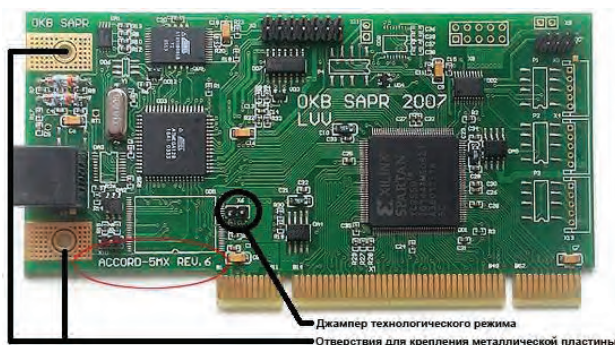


Рисунок 11, контроллер «Аккоррд - 5МХ» rev.6

Затем ПК был загружен в MSDOS с подготовленного USB - накопителя, следом мы запустили исполняемый файл «IP5X.EXE» соответствующий модели контроллера находящийся в составе универсального комплекта ПО очистки БД контроллеров «Аккорд - АМДЗ», записанного нами на этот USB - накопитель ранее. Программа успешно очистила БД контроллера. ПК был выключен, АМДЗ снят, затем на контроллер был установлен джампер технологического режима и закреплена металлическая пластина, фиксирующая плату в корпусе системного блока ПК, АМДЗ установлен в PCI - слот ПК.

PCI (англ. Peripheral component interconnect, дословно – взаимосвязь периферийных компонентов) – шина ввода - вывода для подключения периферийных устройств к материнской плате компьютера [14]. Джампер – перемычка, позволяющая замыканием (размыканием) нескольких контактов сконфигурировать электрическую цепь, обычно слаботочную [5].

Компьютер был включен, после выполнения BIOS ПК автоматически запустилась процедура форматирования БД контроллера, после успешного ее выполнения, контроллер предложил зарегистрировать идентификатор администратора, идентификатор был зарегистрирован, доступ к ПК получен.

Таким образом, была успешно произведена аппаратная очистка базы данных АМДЗ «Аккорд - 5MX» rev. 6 минуя процедуры ИА пользователя.

При использовании АМДЗ необходимо использование актуального ПО, проверять наличие обновлений, такая проверка была проведена, обновления найдены. Было произведено обновление ПО рассматриваемого контроллера. Для этого был выписан серийный номер АМДЗ с платы контроллера, на сайте производителя получен пакет соответствующего ПО, после чего он был скопирован на подготовленный ранее загрузочный USB - диск MSDOS с предварительным удалением из него файла «ee.bin» содержащего иной серийный номер.

Контроллер был переведен в технологический режим, ПК загружен с данного USB - диска, выполнена команда «amdzeegn.exe ee.bin52185768», где 52185768 – серийный номер установленного контроллера, выписанный ранее. Данная программа генерирует файл «ee.bin» содержащий серийный номер рассматриваемого устройства. Затем был запущен командный файл «all _p.bat», после чего началась переустановка ПО контроллера. После успешного обновления ПК был выключен, АМДЗ снят, затем на контроллер был установлен джампер технологического режима и закреплена металлическая пластина, фиксирующая плату в корпусе системного блока ПК, АМДЗ установлен в PCI - слот ПК.

Компьютер был включен, после выполнения BIOS ПК автоматически запустилась процедура форматирования БД контроллера, после успешного ее выполнения, контроллер предложил зарегистрировать идентификатор администратора, идентификатор был зарегистрирован, доступ к ПК получен. Стоит учитывать, что при переустановке программного обеспечения производится очистка базы данных контроллера.

Обратим внимание на то, что в верхней части окна главного меню АМДЗ указана версия V02.01.011, и знак копирайта включает года 1998 - 2000, как изображено на рисунке 5, а после обновления – версия V02.01.015, и указаны 1998 - 2013 года, в главном меню обновленного ПО появился пункт очистки БД контроллера, как изображено на рисунке 17. Данная процедура производит очистку базы данных контроллера, но уже после успешной авторизации. Была проведена такая очистка. После выбора данного пункта ПК стал

очищать БД АМДЗ, после чего была произведена перезагрузка ПК, после выполнения BIOS ПК автоматически запустилась процедура форматирования БД контроллера, после успешного ее выполнения, контроллер предложил зарегистрировать идентификатор администратора, идентификатор был зарегистрирован, доступ к ПК получен. Повторим, что данный способ очистки БД не возможен без авторизации администратора, однако он позволяет произвести очистку БД, не открывая системный блок, и соответственно не извлекая контроллер.

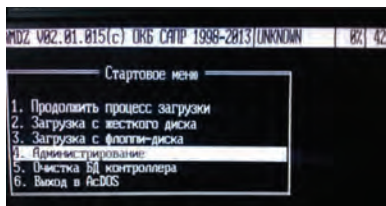


Рисунок 12 – Стартовое меню АМДЗ «Аккорд - 5МХ» rev. 6 после обновления программного обеспечения до версии V02.01.015

Таким образом, в выборе между ПАК «Соболь» «Аккорд - win32», «Криптон - щит», предпочтение рекомендуется отдавать ПАК «Соболь», в виду его более высокой сертификации и наименьшей стоимости. При использовании ПАК, содержащих в своем составе АМДЗ или АПМДЗ необходимо следить за наличием обновлений соответствующего ПО, а также во избежание использования злоумышленником выявленной уязвимости (возможности физического отключения контроллера и получения доступа к информационной системе) необходимо обеспечение соответствующей физической защиты, введение соответствующих организационных мер.

В заключении отметим, что не рекомендуется возлагать надежды лишь на защиту контроллера дополнительным модулем, который не допускает включение ЭВМ без АМДЗ, так как данный вид защиты легко обходится при наличии физического доступа к контроллеру (контроллер переводится в технологический режим и форматируется его база данных).

Список использованной литературы:

1. Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей : Руководящий документ : [Утвержден решением председателя Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации от 4 июня 1999 г. № 114] [Электронный ресурс] // ФСТЭК России : [web - сайт]. <<http://fstec.ru/component/attachments/download/294>> (18.04.2015). – С. 2;
2. Сертификат соответствия программно - аппаратного комплекса < Соболь > от 7 декабря 2009 г. № 1967 в Системе сертификации средств защиты информации по требованиям безопасности информации № РОСС RU.0001.01БИ00 : [Утвержден Начальником 2 Управления ФСТЭК России] [Электронный ресурс] // Код безопасности : [web - сайт] <<http://www.securitycode.ru/upload/iblock/a8c/1967.pdf>> (17.04.2015);

3. Сертификат соответствия программно - аппаратного комплекса < Соболев > от 30 июня 2015 г. № СФ / 527 - 2623 в Системе сертификации РОСС RU.0001.030001 : [Утвержден заместителем руководителя Научно - технической службы – начальником Центра защиты информации и специальной связи ФСБ России; заместителем начальника по лицензированию сертификации и защите государственной тайны ФСБ России] [Электронный ресурс] // Код безопасности: [web - сайт]. <<http://www.securitycode.ru/upload/iblock/4f4/527%202623%D0%9F%D0%90%D0%9A%203.0.pdf>> (17.07.2015);
4. Аккорд - АМДЗ [Электронный ресурс] // Аккорд : [web - сайт] <<http://www.accord.ru/amdz.html>> (08.06.2015);
5. Джампер [Электронный ресурс] // Википедия : [web - сайт] <<https://ru.wikipedia.org/wiki/Джампер>> (28.07.2015);
6. КРИПТОН - ЗАМОК [Электронный ресурс] // ANCUD : [web - сайт] <<http://ancud.ru/crzam.html>> (16.06.2015);
7. ПАК Аккорд - Win32(TSE) и ПАК Аккорд - Win64(TSE) [Электронный ресурс] // Аккорд : [web - сайт] <<http://www.accord.ru/acwin32.html>> (08.06.2015);
8. Поддержка биометрической аутентификации в ПАК «Аккорд - Win32» [Электронный ресурс] // Аккорд : [web - сайт] <<http://www.accord.ru/bio.html>> (08.06.2015);
9. ПСКЗИ ШИПКА [Электронный ресурс] // ISM:MARKET : [web - сайт] <<http://ismmarket.ru/db/ПСКЗИ-ШИПКА>> (08.06.2015);
10. Соболев [Электронный ресурс] // Код безопасности : [web - сайт] <http://www.securitycode.ru/products/pak_sobol/abilities/> (08.06.2015);
11. СРД «КРИПТОН - ЦИТ» [Электронный ресурс] // ANCUD : [web - сайт] <<http://ancud.ru/srd.html>> (16.06.2015);
12. ШИПКА [Электронный ресурс] // shipka.ru : [web - сайт] <<http://www.shipka.ru/>> (08.06.2015);
13. BIOS [Электронный ресурс] // Википедия : [web - сайт] 22.07.2015. <<https://ru.wikipedia.org/wiki/BIOS>> (28.07.2015);
14. PCI // Википедия : [web - сайт] 22.07.2015. <<https://ru.wikipedia.org/wiki/PCI>> (28.07.2015);

© К. Г. Попов, Р. Р. Шамсутдинов, 2015

УДК 621.314

А.Ю. Попов

старший преподаватель Краснодарского ВВАУЛ
г. Краснодар, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Эксплуатируемые в настоящее время автономные источники электроэнергии (АИЭ) бортовых систем электроснабжения (БСЭ) имеют относительно низкие эксплуатационно - технические характеристики (ЭТХ) [6, с. 6–7]. Так, при мощностях генераторов, находящихся в пределах 20–30 кВА КПД автономного источника с приводным двигателем не превышает 60 %, а наличие жестких требований по обеспечению постоянства частоты

вращения ротора генератора приводит к усложнению аппаратуры и, следовательно, снижению надежности в работе и понижению КПД АИЭ в комплексе.

Выбор генератора переменного тока для БСЭ зависит от многих факторов, основными из которых являются: тип бортовой системы электроснабжения, суммарная мощность потребителей электроэнергии по переменному и постоянному току, условия и режимы эксплуатации, массогабаритные показатели, а также требования к показателям надежности, КПД и качеству электроэнергии [7, с. 241]. В общем случае к источникам электроэнергии БСЭ предъявляются следующие требования [10, с. 3–4]:

- 1) максимальная надежность и безопасность работы в условиях жестких климатических условий, механических нагрузок и вибраций;

- 2) высокая прочность (механическая, электрическая, термическая) и перегрузочная способность;

- 3) малый вес и габариты на единицу мощности и высокий КПД;

- 4) высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы напряжения);

- 5) простота и безопасность эксплуатации.

Эти требования обусловили следующие особенности конструкции современных авиационных генераторов [6, с. 37]:

- привод генераторов переменного тока осуществляется, как правило, через привод постоянной частоты вращения;

- ротор имеет большую частоту вращения (от 6000 об / мин), и генератор генерирует ток повышенной частоты (от 200 Гц);

- в рабочих обмотках большая плотность тока, тепловой режим работы повышенный.

Перспективным направлением является применение в БСЭ бесконтактного асинхронного генератора с емкостным возбуждением (АГ) [9, с. 23–27].

Основными недостатками, препятствующими применению АГ, являлись большая масса конденсаторов возбуждения, компенсация реактивной мощности нагрузки и сложность стабилизации напряжения. В настоящее время масса конденсаторов значительно уменьшилась и не превышает 20 % от общей массы генераторов. Полная удельная масса АГ (с учетом массы конденсаторов возбуждения) в настоящее время имеет порядок 0,5–0,8 кг / кВт. При этом КПД АГ находится в пределах 0,91–0,93 [9, с. 35].

АГ имеют следующие основные преимущества в сравнении с синхронными машинами [2, с. 30]:

- 1) простые технические решения устройств защиты в аварийных режимах работы, при этом, при коротких замыканиях АГ развозбуждается;

- 2) при работе на несимметричную нагрузку короткозамкнутая стержневая система магнитосимметричного ротора выполняет роль полной демпферной обмотки, вследствие чего качество электроэнергии, вырабатываемой АГ обеспечивается на достаточно высоком уровне;

- 3) устойчиво возбуждаются при повышенных частотах (400–800 Гц) после потери возбуждения;

- 4) несложная система синхронизации генераторов при включении на параллельную работу.

Исследования показали, что перед АГ раскрываются широкие перспективы для применения в БСЭ, поскольку они имеют повышенную надежность, высокие динамические качества, малые массу и габаритные размеры не смотря на повышенные механические, электромагнитные и тепловые нагрузки, а также способны работать в сложных климатических условиях [1, с. 112–119]. Существенно улучшить характеристики АГ с емкостным возбуждением можно за счет применения систем интенсивного охлаждения, новых материалов (на основе редкоземельных материалов, высокопрочных сплавов, сверхпроводников), бесконтактных опор в виде магнитных и газовых подшипников [5, с. 49–51].

Достоинства АГ могут быть потеряны при использовании в генераторном режиме асинхронных двигателей промышленного исполнения. Такие машины имеют низкий КПД, большую массу и габариты [3, с.35].

Важным является также вопрос, направленный на улучшение технических характеристик АГ, исследование параметров магнитной системы генератора, и прежде всего формы магнитного поля.

В АГ с p парой полюсов статорной обмотки, с числом витков на фазу W и обмоточным коэффициентом $k_{об}$, определённом значению индукции в воздушном зазоре B_δ соответствует относительная величина намагничивающего тока

$$\frac{I_\mu}{I_{1н}} = \frac{\sqrt{2} B_\delta p k_\delta \delta k_\mu}{A D k_{об} \mu_0}, \quad (1)$$

где δ – воздушный зазор; k_δ – коэффициент воздушного зазора; k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи; μ_0 – магнитная постоянная; $I_{1н}$ – номинальный ток статорной обмотки, определяемый по линейной нагрузке A .

Наименьшей относительной величиной намагничивающего тока характеризуются двухполюсные и четырёхполюсные АГ. Однако, для генерирования частоты тока 400 Гц частота вращения их роторов должна быть на величину номинального скольжения выше (соответственно 24000 и 12000 об / мин). Для частоты тока 400 Гц возможны следующие

скорости вращения n генератора при числе p пар полюсов $n = \frac{60 f}{p}$ (таблица 1).

Таблица 1 – Скорости вращения ротора АГ n от числа пар полюсов p

Скорость, об / мин	24000	12000	8000	6000	4800	4000
Число пар полюсов	1	2	3	4	5	6

Напряжение генератора при нагрузке определяет степень насыщения магнитной цепи и параметры статорной обмотки. Увеличение насыщения вызывает в большей степени рост намагничивающего тока, что отрицательно сказывается на мощности генератора, особенно с многополюсной обмоткой, целесообразность применения которой, например в генераторах повышенной частоты тока, обусловлена приемлемой частотой вращения приводного двигателя. Влиять на напряжение генератора изменением параметров статорной обмотки возможно только за счёт её особой конструкции.

Разработка статорных обмоток с конструктивными признаками, способствующими улучшению эксплуатационно - технических характеристик АГ при нагрузке требует анализа современных методов их формирования.

Таким образом, вернуть АГ конкурентоспособность как автономного источника электроэнергии может асинхронная машина, специально проектируемая для работы в генераторном режиме на высоких частотах вращения приводного двигателя.

В настоящее время известно много технических решений стабилизации напряжения высокоскоростных АГ, рассмотренных в [8], где стабилизация напряжения осуществляется за счёт компенсации реактивной мощности нагрузки путём подключения дополнительной ёмкости.

Известны два метода компенсации реактивной мощности: метод продольной и метод поперечной компенсации. Компенсационные (компаундирующие) устройства (КУ), применяемые для стабилизации напряжения АГ, должны увеличивать реактивную ёмкостную мощность по мере увеличения нагрузки генератора и этим компенсировать возрастающую индуктивную мощность. В практике довольно часто применяют метод поперечной компенсации реактивной мощности. При этом параллельно конденсаторам подключается дроссель с подмагничиванием стального сердечника [8, с. 113].

На рисунке 1 представлена функциональная схема автоматического регулирования напряжения АГ с конденсаторами, включенными параллельно обмоткам генератора. Такая схема актуальна для питания низковольтного оборудования самолета.

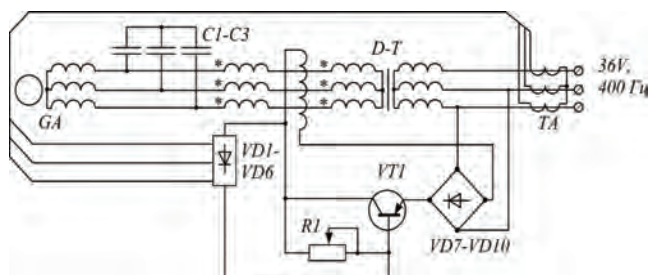


Рисунок 1 – Схема компаундирующего устройства с параллельно включенными конденсаторами для АГ с обратной связью по напряжению и току нагрузки.

D - T – дроссель - трансформатор; *VT1* – транзистор; *VD1–VD6* – выпрямитель обратной связи по току нагрузки; *VD7–VD10* – выпрямитель обратной связи по напряжению; *TA* – трансформатор тока; *C1–C3* – конденсаторная батарея; *GA* – асинхронный генератор; *R1* – переменный резистор.

На холостом ходу (рисунок 1) по обмоткам управления дроссель–трансформатора *D - T* протекает максимальный ток управления. При этом реактивное сопротивление дроссель–трансформатора имеет минимальное значение, и по его первичной обмотке протекает максимальный ток намагничивания, что соответствует максимальному значению поглощаемой трансформатором реактивной мощности, запасенной в конденсаторной батарее *C1–C3*. По мере увеличения нагрузки от холостого хода до номинальной напряжение на зажимах вторичной обмотки дроссель–трансформатора уменьшается, что

приводит к уменьшению тока подмагничивания дроссель–трансформатора, определяемого характеристикой транзистора VT1. Колебания напряжения на зажимах генератора практически не зависят от характера нагрузки и от изменения частоты вращения первичного двигателя в определенных пределах.

На рисунке 2 представлены внешние характеристики АГ с параллельно и последовательно включенными конденсаторами.

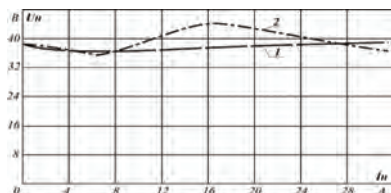


Рисунок 2 – Внешние характеристики опытного образца компаундирующего устройства для АГ. 1 – с параллельно включенными конденсаторами; 2 – с последовательно включенными конденсаторами.

Как видно из рисунка 2 АГ, с параллельно включенными конденсаторами имеет более устойчивую характеристику к токам нагрузки.

В зависимости от величины и характера нагрузки регулируется перераспределение реактивной мощности в системе. Общий баланс реактивной мощности автономной системы остается постоянным, независимо от характера и величины нагрузки.

Суммарная мощность конденсаторной батареи

$$Q_C = Q_B - Q_K = 3U_0 \left[I_\mu (1+b) + \frac{P \operatorname{tg} \varphi_n}{3U_0} \right], \quad (2)$$

где U_0 – напряжение холостого хода генератора; I_μ – ток холостого хода генератора; $\operatorname{tg} \varphi_n$ – коэффициент нагрузки; P – активная мощность нагрузки; $b = 0,4 \div 0,5$ – коэффициент, учитывающий компенсацию магнитного потока генератора.

Исходя из баланса реактивных мощностей, минимальное индуктивное сопротивление дроссель–трансформатора $D - T$, соответствующее холостому ходу, равно:

$$X_{L \min} = \frac{U_0}{bI_\mu + \frac{P \operatorname{tg} \varphi_n}{3U_0}}. \quad (3)$$

С другой стороны, с учетом ряда упрощений индуктивное сопротивление $D - T$ дроссель–трансформатора определяется

$$X_L \cong \frac{\omega w_1^2 \Theta B_m}{2I_0 w_y 10^4}, \quad (4)$$

где ω – угловая частота, с^{-1} ; w_1 – число витков первичной обмотки; w_y – число витков обмотки управления; Θ – сечение магнитопровода; B_m – магнитная индукция; I_0 – ток управления.

Общая емкость конденсаторной батареи

$$C_{\Sigma} = \frac{Q_C}{3U_0^2 \omega} \cdot (5)$$

Перспективной является функциональная схема автоматической стабилизации напряжения АГ, показанная на рисунке 3, которая обеспечивает стабилизацию напряжения с точностью до $\pm 2,5\%$.

Схема автоматической стабилизации напряжения (рис.3) содержит асинхронный генератор GA, приводимый во вращение двигателем внутреннего сгорания DVS. К статору асинхронного генератора GA подключена батарея некоммутируемых конденсаторов возбуждения C1–C3, батарея коммутируемых конденсаторов C4–C6 и группа пусковых конденсаторов C7–C9, последовательно с которой включены токоограничивающие резисторы R1–R3. Параллельно пусковым конденсаторам C7–C9 включен трехфазный электронный ключ, выполненный на симисторах VS1–VS3. В нулевой точке батареи коммутируемых конденсаторов C4–C6 включена схема широтно - импульсного управления UZ, вход которой соединен с выходом измерительного трансформатора ТА. Блок управления AD с одной стороны соединен с фазами генератора GA, а с другой стороны – с управляющими электродами симисторов VS1–VS3.

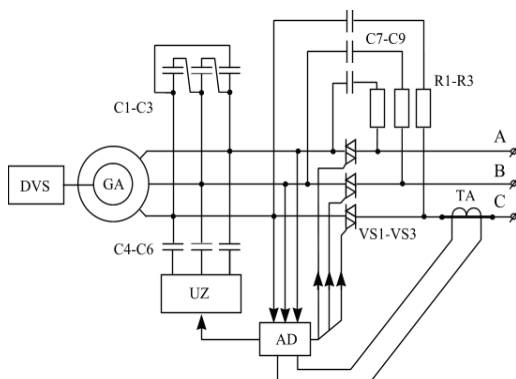


Рисунок 3 – Схема стабилизации напряжения АГ автономного источника.

GA – асинхронный генератор; C1 - C3 – конденсаторы возбуждения; C7 - C9 – группа пусковых конденсаторов; UZ – схема управления; AD – блок управления;
VS1 - VS3 – симисторы; R1 - R3 – токоограничивающие резисторы;
C4-C6 – коммутируемые конденсаторные батареи.

Устройство для автоматического регулирования напряжения АГ работает следующим образом. После запуска приводного двигателя DVS генератор самовозбуждается от батареи некоммутируемых конденсаторов C1–C3. Напряжение АГ поступает на блок управления UZ. Блок управления подает сигнал на включение трехфазного электронного ключа VS1–VS3. Последний включается и подает напряжение к выводам А, В, С, к которым подключается нагрузка. На холостом ходу работы генератора батарея коммутируемых конденсаторов C4–C6 отключена. При подключении нагрузки напряжение на выводах АГ

уменьшается, и схема широтно - импульсного управления UZ пропорционально снижению напряжения увеличивает емкостный ток батареи коммутлируемого конденсатора C4–C6, обеспечивая компенсацию реактивной мощности нагрузки, и тем самым восстанавливая напряжение на выводах А, В и С генератора.

При подключении двигательной нагрузки, соизмеримой с мощностью АГ, возрастает ток в цепи, напряжение АГ снижается, так как ёмкости батареи коммутлируемых конденсаторов C4–C6 недостаточно для компенсации реактивной составляющей нагрузки. Сигнал от трансформатора тока ТА увеличивается, и блок управления отключает электронный ключ VS1–VS3, при этом нагрузка оказывается включенной последовательно с пусковыми конденсаторами C7–C9. Последние компенсируют индуктивную составляющую пускового тока и восстанавливают напряжение на зажимах генератора. После запуска двигательной нагрузки соизмеримой мощности ток в цепи нагрузки уменьшается, это приводит к тому, что блок управления подает сигнал на включение трехфазного электронного ключа, который включается и шунтирует группу пусковых конденсаторов. Дальнейшее питание нагрузки происходит через электронный ключ VS1–VS3, а регулирование напряжения осуществляется схемой широтно - импульсного управления UZ .

Использование предложенного устройства для автоматического регулирования напряжения АГ позволяет в автономных системах запускать даже двигатели единичной мощности, равной мощности генератора. Это особенно важно для БСЭ.

Еще один вариант регулятора, обеспечивающего стабилизацию и регулирование частоты АГ, приведен на рисунке 4. На холостом ходу скорость вала синхронного двигателя CD и центробежного регулятора оборотов BW пропорциональна частоте тока GA. При увеличении нагрузки на зажимах А, В, С АГ, увеличивается его скольжение, частота тока уменьшается, уменьшается скорость вращения вала CD, центробежный регулятор воздействует на устройство подачи топлива AA, увеличивается подача топлива и увеличивается скорость приводного двигателя DVS, частота тока АГ возрастает.

Стабильность частоты определяет астатизм центробежного регулятора BW, т.е. синхронный двигатель CD вращает регулятор со скоростью, строго пропорциональной частоте питающего тока.

Достоинством предлагаемого устройства является простота реализации и точность регулирования частоты выходного тока.

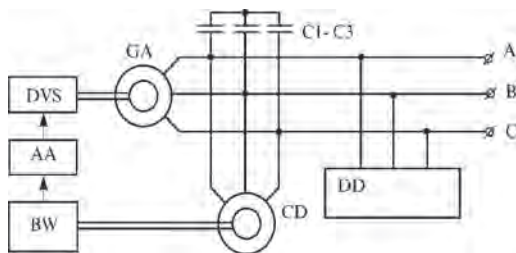


Рисунок 4 – Функциональная схема автономного источника с регулятором частоты АГ. DVS – приводной двигатель; GA – асинхронный генератор; AA – устройство подачи топлива; C1 – C3 – конденсаторы возбуждения; DD – устройство стабилизации; CD – статор синхронного двигателя; BW – регулятор оборотов.

Таким образом, стабилизация напряжения АГ при переменной частоте вращения принципиально возможна с помощью всех способов регулирования основного магнитного потока, описанных выше.

Для улучшения регулировочных характеристик АГ коммутацию конденсаторов, обеспечивающих возбуждение и компенсацию реактивной мощности нагрузки, необходимо выполнять при переходе синусоиды через ноль (ось абсцисс). Таким условиям отвечает твердотельное реле, выполненные на симисторах или тиристорах.

Функциональные схемы силовой части устройства для регулирования и стабилизации напряжения АГ и блока управления стабилизатором напряжения генератора приведены на рисунке 5 и рисунке 6 соответственно.

В качестве трёхфазных ключей 5–7 применяются трёхфазные электронные реле переменного тока с контролем фазы коммутируемого напряжения через «ноль».

Компараторы 17–22 (рис. 6) имеют обратную связь для создания петли гистерезиса, причём у компаратора 22 она наибольшая, а у компаратора 17 – наименьшая.

Устройство для регулирования и стабилизации напряжения АГ работает следующим образом. При достижении заданной частоты вращения ротора АГ самовозбуждается от батареи некоммутируемых конденсаторов 2.

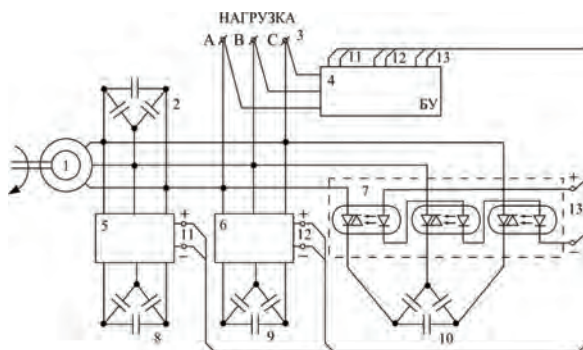


Рисунок 5 – Функциональная схема силовой части устройства для регулирования и стабилизации напряжения АГ: 1 – асинхронный генератор; 2 – батарея некоммутируемых конденсаторов; 3 – выходные контакты АГ; 4 – блок управления; 5, 6, 7 – трёхфазные электронные ключи; 8, 9, 10 – батареи коммутируемых конденсаторов; 11, 12, 13 – оптронные входы электронных ключей.

Ёмкость этих конденсаторов выбрана таким образом, чтобы на холостом ходу АГ имел максимально допустимое напряжение, например 400 / 230 В. Это напряжение через фазные выходные контакты статора 3 (А, В, С) поступает на блок управления (БУ) 4, (рис. 6) выпрямляется трёхфазным выпрямителем 14, фильтруется конденсатором фильтра 15 и 16 подаётся на неинвертирующие входы компараторов 17–22.

За счёт стабильного опорного напряжения 28 (U_{on}), через делители напряжения 23–27 компараторы переключаются в единичное состояние, через дешифратор 29 и оптроны 11–13 ток не протекает, трёхфазные электронные ключи 5–7 закрыты, и батарея коммутируемых конденсаторов 8–10 не оказывает влияния на режим АГ.

При подключении нагрузки к фазным выходным контактам статора 3 (А, В, С) АГ его напряжение уменьшается, уменьшается сигнал с переменного резистора 16, (рис. 6) и компаратор 22 переключается в нулевое состояние, по светодиоду 11 протекает ток, трёхфазный электронный ключ 5 срабатывает, батарея коммутируемых конденсаторов 8 подключается к обмотке статора АГ 1. Происходит частичная компенсация реактивной составляющей нагрузки.

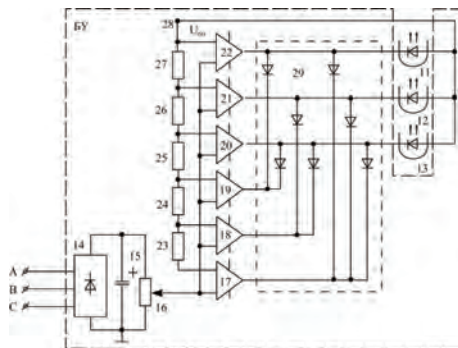


Рисунок 6 – Функциональная схема блока управления стабилизатором напряжения: 11, 12, 13 – оптронные входы трёхфазных электронных ключей 5,6,7 (рисунок 5); 14 – трёхфазный выпрямитель обратной связи; 15 – конденсатор фильтра; 16 – переменный резистор; 17–22 – компараторы напряжения; 23–27 делители напряжения; 28 – источник опорного стабильного напряжения; 29 – дешифратор, который является выходом блока управления.

При дальнейшем снижении напряжения на фазных выходных контактах статора 3 (А, В, С) переключаются компараторы 21, 20, 19 и т.д., поочерёдно подключая батареи коммутирующих конденсаторов 8–10 к статору АГ 1, тем самым стабилизируя напряжения.

При уменьшении нагрузки компараторы 17–22 отключаются в обратной последовательности за счёт того, что у каждого из них имеется разный диапазон петли гистерезиса; происходит стабилизация напряжения при изменении нагрузки.

Таким образом, предложенные функциональные схемы стабилизации напряжения позволяют улучшить технические характеристики АГ.

Особенностью проектирования АГ, привод которых осуществляется от высокоскоростных двигателей, является введение ограничений, связанных с максимальными электромагнитными нагрузками (линейной нагрузкой А и магнитной индукцией в воздушном зазоре B_δ), геометрическими размерами активной части машины, предельными скоростями ротора (определяемыми его прочностью) [1, с. 254, 4, с. 38–39].

Известно, что полная мощность генератора, с учетом электромагнитной нагрузки и геометрических размеров, определяется по формуле

$$S = knAB_\delta\lambda D^3. (6)$$

Тогда внутренний диаметр статора АГ

$$D = \sqrt[3]{\frac{S}{kAB_\delta\lambda n}}, (7)$$

где

$$k = (k_B k_{\sigma} \pi^2 \alpha_p) / 60. \quad (8)$$

Предельно допустимые значения частоты вращения $n_{\max}$ определяются прочностными характеристиками ротора. В настоящее время подшипники скольжения имеют хорошие технические характеристики, в том числе, ресурс работы, поэтому они не являются определяющим фактором ограничений при проектировании высокоскоростных генераторов.

Окружная скорость ротора $v_{\max}$ должна соответствовать прочностным характеристикам ротора АГ. Если АГ оптимизируется по удельной массе, что является типичной задачей для БСЭ, и частота тока жестко не фиксируется, то ограничения, связанные с прочностью ротора, могут приближенно учитываться соотношением вида:

$$n_{\max} = \frac{C_{\Pi}}{D^{\nu}}, \quad (9)$$

где C_{Π} – постоянная, определяемая прочностными свойствами материала ротора; ν – показатель, зависящий от конструктивного исполнения ротора (наличия консольных выступов, вида бандажей и т.д.). Чем сложнее конструкция ротора, тем больше значение ν .

Если ротор имеет цилиндрическую форму, то $\nu = 1$. В этом случае прочность ротора может характеризоваться предельной окружной скоростью $v_{\max}$ которая независимо от внутреннего диаметра статора определяется по формуле

$$v_{\max} = \frac{\pi D n_{\max}}{60}. \quad (10)$$

Роторы АГ с приводом от высокоскоростных двигателей, как правило, имеют повышенной прочности бандажи, поэтому можно принять $\nu \approx 1$ и определить $n_{\max}$ по заданному значению $v_{\max}$ с учетом, что $k_B k_{\sigma} \approx 1$, тогда

$$D = \sqrt{\frac{S}{\pi \alpha_{\sigma} \lambda A B_{\delta} g_{\max}}}. \quad (11)$$

Ограничение на электромагнитные нагрузки определяет выбор предельных значений A и B_{δ} , обеспечивающих минимальные размеры АГ.

Необходимо учитывать, что с ростом линейной нагрузки A снижается ЭДС E , а следовательно, уменьшается выходное напряжение генератора за счет реакции якоря. Кроме того ограничения на линейную нагрузку A по тепловым режимам обмотки статора должны согласовываться с плотностью тока j , которая при заданных размерах статора линейно связана с A . Часто тепловые нагрузки электрических машин характеризуют произведением Aj [1, с. 89].

Для машин средней мощности с самовентиляцией $j \approx 4-10 \text{ А / мм}^2$, $A \approx (1,5-3) 10^4 \text{ А / м}$, с принудительным воздушным охлаждением $j \approx 10-6 \text{ А / мм}^2$, $A \approx (2-5) 10^4 \text{ А / м}$, с жидкостным охлаждением $j \approx 20-30 \text{ А / мм}^2$, $A \approx (6-10) 10^4 \text{ А / м}$.

Магнитная индукция в зазоре имеет характерные значения $B_{\delta} \approx 0,5 - 1 \text{ Тл}$ и не может быть существенно увеличена из-за чрезмерного насыщения стали в зубцовой зоне статора.

Как известно, обратное значение $(k A B_{\delta})^{-1} = C_A$ называется коэффициентом использования машины.

Одно и то же значение коэффициента использования можно получить при умеренных значениях A и повышенных B_δ или, наоборот, при повышенных A и относительно низких B_δ . В первом случае электрическая машина имеет увеличенный магнитопровод, а во – втором относительно большой объем обмоток. Генераторы в автономных транспортных системах относятся ко второму типу машин, имеющих пониженный объем магнитопровода и, соответственно, меньшие значения удельной массы.

Ограничения на геометрический фактор, входящий в основное расчетное уравнение (11), связаны, в первую очередь, с характером замыкания магнитного потока. АГ имеют радиальный поток. Для машин с радиальным потоком ограничения на величину λ определяются главным образом прочностными требованиями, и λ может меняться в относительно широких пределах. Однако существует рациональное значение λ , зависящее от числа пар полюсов. Для АГ $\lambda \approx 1,6 p^{-2/3}$.

При проектировании АГ необходимо также учитывать, что при малых значениях λ ($\leq 0,3$) снижается относительно полезный объем машины по сравнению с объемом конструктивных элементов, лобовых частей обмоток и т.п., а при больших значениях λ (> 3) их сложно реализовывать из-за увеличенных прогибов вала и возможного совпадения частоты вращения n с критическими значениями $n_{кр}$, соответствующими резонансным явлениям.

Критические значения частоты вращения определяется по приближительной формуле:

$$n_{кр} \approx 30 / \sqrt{y}, \quad (12)$$

где y – статический прогиб вала под действием силы тяжести ротора.

Значение y составляет порядка 10 % величины рабочего воздушного зазора δ . Очевидно, что при заданном внутреннем диаметре статора генератора D значение y тем больше, чем больше λ .

На рисунках 7 и 8 приведены зависимости внутреннего диаметра статора АГ (габаритный показатель) от мощности генератора. Графики позволяют сделать следующие выводы. С увеличением частоты вращения приводного двигателя генератора n и линейной нагрузки A улучшаются массогабаритные показатели генератора. Однако при проектировании генераторов необходимо учитывать технические характеристики подшипников и то, что увеличение линейной нагрузки приводит к увеличению плотности тока в обмотках статора, а значит, потребует разработки интенсивных систем охлаждения.

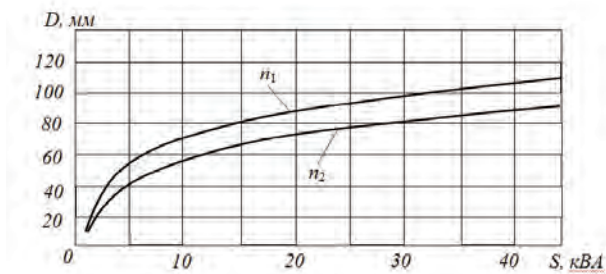


Рисунок 7 – Зависимости внутреннего диаметра статора (D) от мощности АГ (S):

$n_1 = 6000$ об / мин; $n_2 = 12000$ об / мин, $A = 30000$ А / м, $B_\delta = 1$ Тл, $\lambda = 1,5$

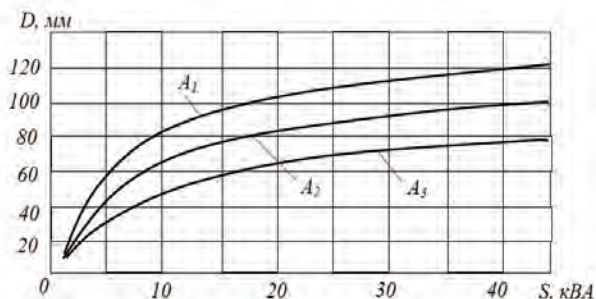


Рисунок 8 – Зависимости внутреннего диаметра статора (D) от мощности АГ (S): $A_1 = 15000 \text{ А / м}$ ($j = 8 \text{ А / мм}^2$); $A_2 = 30000 \text{ А / м}$ ($j = 12 \text{ А / мм}^2$); $A_3 = 50000 \text{ А / м}$ ($j = 18 \text{ А / мм}^2$); $n = 12000 \text{ об / мин}$, $B_\delta = 1 \text{ Тл}$, $\lambda = 1,5$

Для того, чтобы определить основные потери и КПД АГ, предлагается на этапе проектирования машины использовать упрощенные формулы, позволяющие ускорить расчет и предварительно дать оценку параметрам проектируемой машины [9, с. 87–92].

Как известно, электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{эл} = m I_1^2 r_1, \quad (13)$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Магнитные потери в статоре

$$\Delta P_{cm} \approx 2 \rho_c B_c^2 (f / 400)^{1,5} M_c, \quad (14)$$

где ρ_c – удельные потери в электротехнической стали, которые составляют $2,5\text{--}5,5 \text{ Вт / кг}$; $B_c \approx (1,2\text{--}1,6) \text{ Тл}$ – магнитная индукция стали; M_c – масса стали статора.

Приблизительно масса стали может быть определена по формуле

$$M_c \approx \frac{\pi}{4} m_c k_n l (D_n^2 - D^2), \quad (15)$$

где $m_c = 7800 \text{ кг / м}^3$ – удельная масса стали; $k_n \approx 0,8\text{--}0,9$ – коэффициент, учитывающий объем паза статора; $D_n = k_D D$ – наружный диаметр статора генератора; $k_D = 1,3\text{--}1,9$ – коэффициент, зависящий в основном от числа полюсов генератора.

Механические потери $\Delta P_{мех}$ определяются потерями на трение в подшипниках и потерями на вентиляцию. При использовании вентилятора и для $n > 6000 \text{ об / мин}$ основной вклад в механические потери вносит вентилятор, которые могут оцениваться по формуле

$$\Delta P_{мех} \approx 8 \cdot 10^{-3} \cdot n^2 \cdot D^3. \quad (16)$$

Поверхностные потери ΔP_n в наружном цилиндре ротора возникают из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора

$$\Delta P_n \approx 23 \pi D l \alpha_p n^{1,5} (D \pi B_o)^2 / \sqrt{Z}, \quad (17)$$

где $B_o \approx (0,2\text{--}0,3) \text{ Тл}$.

С учетом приведенных выше уравнений получим, что

$$\Delta P_n \approx 18,26 D^3 l \cdot n^{1,5} / \sqrt{Z}. \quad (18)$$

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = \frac{S \cos \varphi_n}{S \cos \varphi_n + \sum \Delta P}, \quad (19)$$

где $\sum \Delta P = \Delta P_{\text{дог}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_n$ – сумма всех потерь генератора.

На рисунке 9 приведены графики зависимостей основных потерь от мощности АГ. Как видно из рисунка 9, основными потерями высокоскоростного АГ являются электрические потери $\Delta P_{\text{эл}}$, далее механические $\Delta P_{\text{мех}}$ и потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$.

На рисунке 9 не приведены графики поверхностных ΔP_n и дополнительных потерь $\Delta P_{\text{дог}}$ потому что их общее значение не превышает 1 % от всех потерь в электрической машине.

Полную массу генератора M можно определить через массу активных материалов M_A , как $M = k_k M_A$, где $k_k = 1,5-1,8$ – конструктивный коэффициент, учитывающий массу конструктивных элементов (лобовых частей обмоток подшипниковых щитов, корпуса, и т.п.). В свою очередь, масса активных материалов

$$M_A = (\gamma k_\gamma \pi D_n^2 l) / 4, \quad (20)$$

где $\gamma \approx 8000 \text{ кг} / \text{м}^3$ – средняя плотность активных материалов на статоре и роторе; $k_\gamma \approx 0,8$ – коэффициент плотности, характеризующий заполнение машины активными материалами на длине.

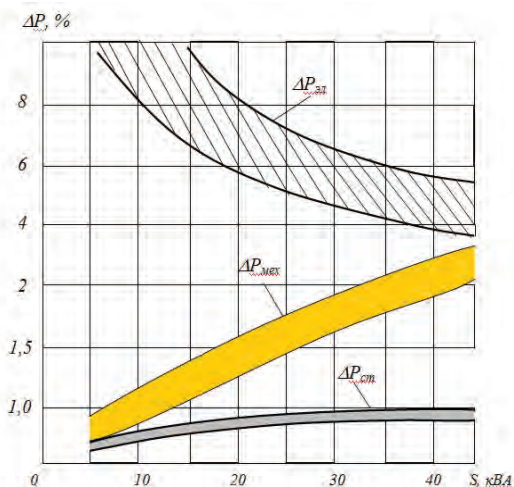


Рисунок 9 – Графические зависимости основных потерь ΔP от мощности АГ (S): $U_n = 208 \text{ В}$; $\lambda = 1,5$; $A = 30000 - 35000 \text{ А} / \text{м}$; $B_\delta = 0,8 - 1,0 \text{ Тл}$; $j_1 = 14 - 16 \text{ А} / \text{мм}^2$; $n = 12000 \text{ об} / \text{мин}$.

С учетом (20) удельная масса генератора

$$m_p = (1,4 \pi k_D^2 k_\gamma \gamma) / (4 k A B_\delta n), \quad (21)$$

откуда следует, что для снижения удельной массы генератора необходимо, во - первых, минимизировать произведение $k_D^2 k_\gamma \gamma$, что связано с реализацией оптимальных

конструктивных исполнений машины, а во - вторых, иметь максимально допустимые электромагнитные нагрузки A и B_δ и частоты вращения n .

Если бесконтактные генераторы предназначены для работы с предельными механическими нагрузками, тогда значение минимальной его удельной массы при максимальных оборотах, равно:

$$m_{p\min} = [1,4k_D^2 k_\gamma \gamma (S / \pi \lambda)^{1/2}] / [4(\alpha_p AB_\delta v_{\max})^{3/2}], \quad (22)$$

$$n_{\max} = 60(v_{\max})^{3/2} [\alpha_p \lambda AB_\delta / (\pi S)]^{1/2}. \quad (23)$$

В этом случае с ростом расчетной мощности S максимальная частота вращения $n_{\max}$ уменьшается, а значение удельной массы $m_{p\min}$ может увеличиваться. Естественно, эти закономерности проявляются при достаточно слабой зависимости AB_δ от S , что обычно имеет место для генераторов средней и большой мощности.

Записанные выше формулы не только показывают характерные зависимости между основными параметрами высокоскоростных АГ, но могут использоваться и для предварительной оценки возможностей применения различных типов бесконтактных электрических машин в определенных условиях эксплуатации.

По заданной скорости $v_{\max}$, непосредственно связанной с допустимыми механическими напряжениями в роторе, можно оценить предельную мощность АГ

$$S_{np} = (k_B k_{об} \alpha_p 60^2 / \pi) \lambda AB_\delta (v_{\max}^3 / n^2). \quad (24)$$

На этапе проектирования, с учетом известных формул, можно построить графики зависимости предельной мощности S_{np} от $n_{\max}$ и определить массогабаритные показатели АГ.

Удельная масса АГ, работающих с предельными окружными скоростями, может возрастать с увеличением их размеров и возникает ситуация, когда вместо одной машины с повышенной мощностью целесообразно иметь две машины с той же суммарной мощностью. Это связано с тем, что при фиксированной скорости $v_{\max}$ по мере увеличения диаметра активной части машины D приходится снижать n , и возрастание мощности S происходит медленнее, чем рост массы. Это очевидно с физической точки зрения, так как увеличение частоты вращения при заданной линейной скорости должно сопровождаться уменьшением размеров электрической машины.

Целесообразно проектирование АИЭ осуществлять в составе БСЭ, поскольку иногда выгоднее занизить основные критерии эффективности АГ, для того чтобы улучшить, к примеру, массогабаритные показатели статических преобразователей, за счет повышенной частоты генерируемого напряжения АИЭ, которая получается путем увеличения числа пар полюсов генератора.

Таким образом, для повышения эффективности проектирования АГ на начальных этапах проектирования необходимо проводить предварительную оценку основных критериев эффективности АГ. Рассмотренная выше методика упрощенного расчета и графики показывают характерные особенности зависимостей между основными параметрами АГ и могут использоваться для предварительной оценки возможностей применения различных бесконтактных АГ на начальных этапах проектирования для заданных условий эксплуатации, т.е. в составе конкретных структурных решений БСЭ.

Список использованной литературы:

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. Пособие для вузов [Текст] / Д.А. Бут. – М.: Высш. шк. – 1990. – 416 с.
2. Григораш О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике [Текст] / О.В. Григораш // Промышленная энергетика. – 1995. – № 3. – С. 29 – 32.
3. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения [Текст] / О.В. Григораш // Электротехника. – 2002. – № 1. – С.30 – 35.
4. Григораш О.В. Оценка эффективности бесконтактных высокоскоростных генераторов на этапе проектирования [Текст] / О.В. Григораш, Д.В. Мельников, А.В. Дацко // Промышленная энергетика. – 2002. – № 4. – С. 38 – 41.
5. Григораш О.В. Модульные системы гарантированного электроснабжения [Текст] / О.В. Григораш, С.В. Божко, Д.А. Нормов. – Краснодар, 2006. – С. 306.
6. Григораш О.В. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы [Текст] / О.В. Григораш, С.В. Божко, А.Ю. Попов и др. – Краснодар, 2012. – С. 174.
7. Попов А.Ю. Способы повышения надежности бортовых источников электрической энергии [Текст] / А.Ю. Попов, Я.М. Кашин, Ю.Н. Тонкошуров. Матер. II межд. НПК Краснодар: КВВАУЛ, 2010. – С. 240–246.
8. Попов В.И. Современные асинхронные электрические машины [Текст] / В.И. Попов, Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров. – М.: Знак, 1999. – С. 256.
9. Попов А.Ю. Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационно - техническими характеристиками для автономных систем электроснабжения: канд. техн. наук / Дис.– Краснодар, 2012. – С. 157.
10. Птицын О.В. Генераторы переменного тока. Состояние и перспективы [Текст] / О.В. Птицын, О.В. Григораш // Электротехника. – 1994. – № 9. – С. 2 – 6.

© А.Ю. Попов, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Ю.А.Балакин, А.А.Будник, И.В.Соколов ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕМСЯ МЕТАЛЛЕ	3
И.В. Кулешов, О.Г. Москалёва ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИИ ЗАМЕРНЫХ УЗЛОВ ЦЕХОВ ПО ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА	19
Л.Г. Ловцова ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТИМУЛИРОВАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ МЕДНОЙ СОНОГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ И ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	31
К.Г. Попов, Р.Р. Шамсутдинов ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ, ХРАНИМОЙ НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ	44
К.Г. Попов, Р.Р. Шамсутдинов СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНО - АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДОВЕРЕННУЮ ЗАГРУЗКУ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	57
А.Ю. Попов ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	72



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в Международных научно-практических конференциях проводимых нашим центром.

Форма проведения конференций: заочная, без указания формы проведения в сборнике статей;

По итогам конференций издаются сборники статей конференций. Сборникам присваиваются соответствующие библиотечные индексы УДК, ББК и международный стандартный книжный номер (ISBN)

Всем участникам высылается индивидуальный сертификат участника, подтверждающий участие в конференции.

В течении 10 дней после проведения конференции сборники статей размещаются на сайте aeterna-ufa.ru а так же отправляются в почтовые отделения для осуществления рассылки. Рассылка сборников производится заказными бандеролями.

Сборники статей размещаются в научной электронной библиотеке elibrary.ru и регистрируются в наукометрической базе **РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)**

Стоимость публикации от 130 руб. за 1 страницу. Минимальный объем-3 страницы

С информацией и полным списком конференций Вы можете ознакомиться на нашем сайте aeterna-ufa.ru

Научно-издательский центр «Аэтерна»

Aeterna-ufa.ru

+7 (347) 266 60 68

info@aeterna-ufa.ru



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**Приглашаем Вас опубликовать результаты исследований в
Международном научном журнале «Инновационная наука»**

Журнал «Инновационная наука» является ежемесячным изданием. В нем публикуются статьи, обладающие научной новизной и представляющие собой результаты завершенных исследований, проблемного или научно-практического характера.

Журнал издается в печатном виде формата А4

Периодичность выхода: 1 раз месяц.

Статьи принимаются до 12 числа каждого месяца

В течении 20 дней после издания журнал направляется в почтовые отделения для осуществления рассылки.

Журнал размещён в научной электронной библиотеке elibrary.ru и зарегистрирован в наукометрической базе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)

Научно-издательский центр «Аэтерна»

Aeterna-ufa.ru

+7 (347) 266 60 68

science@aeterna-ufa.ru

Научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ
АСПЕКТЫ**

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

В авторской редакции

Подписано в печать 29.12.2015 г. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 3,30. Тираж 500. Заказ 359.

**Отпечатано в редакционно-издательском отделе
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «АЭТЕРНА»**

450076, г. Уфа, ул. М. Гафури 27/2

aeterna-ufa.ru

info@aeterna-ufa.ru

+7 (347) 266 60 68