

## ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

**Кузьмин В. М., Дубровский И. Н.**  
**V. M. Kuzmin, I. N. Dubrovskiy**

### **ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ**

### **POWER SUPPLIES FOR DECENTRALIZED POWER SUPPLY SYSTEMS**



**Кузьмин Вячеслав Матвеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.  
**Mr. Vyacheslav M. Kuzmin** - Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electromecanics, Komsomolsk-on-Amur Sate Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



**Дубровский Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.  
**Mr. Igor N. Dubrovskiy** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Military Training Department of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru

**Аннотация.** Изложены требования, предъявляемые к автономным источникам электропитания с формированием напряжения в электромашинном генераторе. Определены основные соотношения. Разработана математическая модель. Приведены результаты исследований.

**Summary.** The paper considers requirements made for independent sources of power supply with voltage shaping by an electric generator. Basic relations are defined. A mathematical model is developed. Research results are presented.

**Ключевые слова:** автономный источник, математическая модель, исследования.

**Key words:** independent source, mathematical model, research.

УДК 621.311:621.314.5

В качестве автономных источников электропитания переменного тока стабильной частоты разработано большое число различных устройств, отличающихся как принципом действия, так и конструктивным исполнением.

В децентрализованных системах с приводом постоянной скорости (ППС) получение стабильной частоты достигается путем установки между генератором и первичным валом промежуточного устройства, которое при изменении частоты вращения первичного вала поддерживает частоту вращения вала генератора неизменной. В качестве промежуточного устройства ППС могут применяться механические многоступенчатые муфты и передачи, системы с гидромуфтами и механико-гидравлическими передачами, системы с электромагнитными муфтами, тормозом и дифференциалом, а также электромашинные каскадные системы. Применение автономных источников с ППС ограничено их громоздкостью, сложностью изготовления, низким быстродействием и малой надежностью.

В автономных системах, выполненных по принципу «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ), вал генератора непосредственно связан с валом первичного двигателя, имеющего переменную частоту вращения. Стабилизация частоты выходного напряжения осуществляется посредством полупроводникового преобразователя частоты, включенного либо в цепь возбуждения, либо в цепь нагрузки генератора. Как правило, частота выходного напряжения в таких системах равна промышленной (50 Гц), а частота напряжения генератора либо равна промышленной, либо намного выше (400...600 Гц).

В децентрализованных системах энергообеспечения, использующих для получения тепловой энергии электронагревательные устройства трансформаторного типа, целесообразно использовать для питания этих устройств напряжение повышенной частоты. При изменении частоты вращения вала генератора частота и величина его напряжения могут изменяться в широких пределах (в 4...5 раз). В этом случае электродвижущая сила витка нагревательного элемента может превышать предельно допустимое значение.

Исходя из вышеизложенного, в качестве источника электропитания для децентрализованных энергосистем с электронагревателями трансформаторного типа целесообразно использовать источник, отвечающий следующим требованиям:

- 1) частота напряжения генератора должна быть выше, чем частота (промышленная) выходного напряжения источника;
- 2) схема источника должна предусматривать возможность использования электронагревателей трансформаторного типа в качестве балластной нагрузки;
- 3) в источнике должна быть предусмотрена возможность подключения электронагревателей к цепям, частоты напряжений которых отличаются друг от друга.

Указанным требованиям в полной мере отвечают автономные источники электропитания с формированием напряжения электромашинного генератора путем сложения электродвижущей силы (ЭДС) близких частот [3]. Предлагаемый источник выполнен на основе двух асинхронных машин, установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе (см. рис. 1).

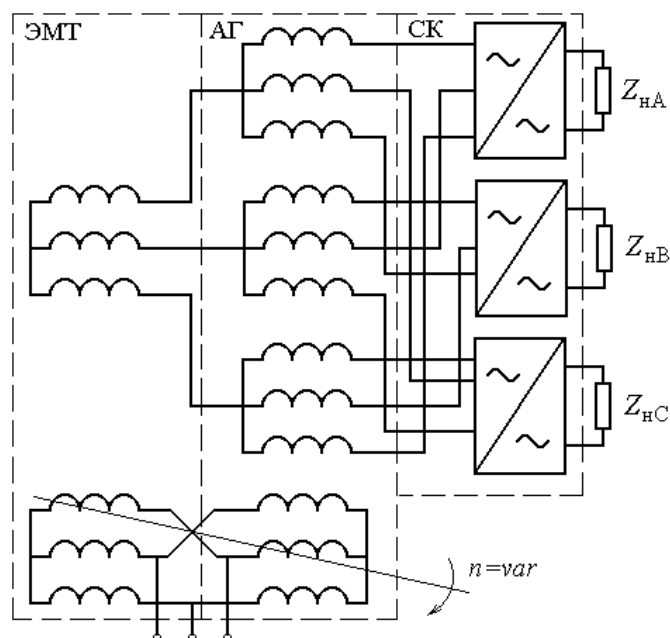


Рис. 1. Схема автономного источника с электромашинным формированием кривой выходного напряжения

Роторные обмотки машин подключены к источнику переменного тока стабильной частоты таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая – в режиме асинхронного генератора (АГ). Якорная обмотка ЭМТ выполне-



на в виде обычной трехфазной обмотки. На статоре АГ расположены три идентичные трехфазные обмотки, уложенные в одни пазы. Выводы статорной обмотки ЭМТ подключены к нулевым точкам статорных обмоток АГ. Силовой полупроводниковый коммутатор СК служит для выделения огибающих биений выходного напряжения электромашинного генератора.

В статорной обмотке ЭМТ и АГ индуцируется трехфазная ( $m = 3$ ) система ЭДС. При произвольном числе фаз ЭДС генератора определяются следующим образом:

- для машины, работающей в режиме ЭМТ:

$$e_{1i} = E_{1m} \sin \left[ (\omega_1 + \omega_0)t - (i-1) \frac{2\pi}{m} \right],$$

где  $E_{1m}$  – амплитуда ЭДС статорной обмотки ЭМТ;  $\omega_1$  – угловая частота ЭДС вращения;  $\omega_0$  – угловая частота тока возбуждения;  $i = 1, 2, 3$  – номер фазы статорной обмотки ЭМТ;  $m$  – число фаз статорной обмотки ЭМТ;

- в статорных обмотках АГ индуцируются ЭДС

$$e_{2j} = E_{2m} \sin \left[ (\omega_1 - \omega_0)t - (j-1) \frac{2\pi}{m} \right],$$

где  $E_{2m}$  – амплитуда ЭДС статорной обмотки АГ;  $j = 1; 2; 3$  – номер фазы статорной обмотки АГ;  $m$  – число фаз статорной обмотки АГ.

Тогда при равенстве амплитуд ЭДС машин  $E_{1m} = E_{2m} = E_m$  ЭДС электромашинного генератора определяются следующим образом:

$$e_{ij} = e_{1i} + e_{2j},$$

или

$$e_{ij} = 2E_m \sin \left[ \omega_1 t - (i+j-2) \frac{\pi}{m} \right] \cos \left[ \omega_0 t - (i-j) \frac{\pi}{m} \right]. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что огибающие результирующих ЭДС обмоток, подключенных к первому коммутатору, сдвинуты по фазе относительно ЭДС обмоток, подключенных ко второму коммутатору на  $1/2m$  периода тока возбуждения или на  $\pi/m$  собственного периода. Аналогичным образом можно установить, что огибающие результирующих ЭДС обмоток, соединенных с третьим силовым коммутатором, сдвинуты по фазе относительно огибающих ЭДС обмоток, подключенных к первому коммутатору на  $1/m$  их собственного периода.

Таким образом, машинно-вентильный источник, схема которого приведена на рис. 1, позволяет получить три системы трехфазных модулированных напряжений со сдвигом огибающей каждой системы на треть периода. Осуществив с помощью силового коммутатора выделение модулирующих функций, можно получить трехфазное напряжение, близкое по форме к синусоидальному, частота которого будет равна частоте переменного тока возбуждения.

С целью повышения надежности децентрализованных систем электроснабжения разработаны источники, в которых электромашинные генераторы выполнены бесконтактными. Источники также содержат ЭМТ и АГ, но для достижения бесконтактности снабжены возбуждателями, выполненными на основе асинхронных машин АВ или бесколлекторных машин постоянного тока (БМПТ). Принципы действия этих устройств являются такими же, как и у рассмотренного выше источника.

Одним из наиболее перспективных типов таких источников является устройство, выполненное по схеме (см. рис. 2), в которой машины, составляющие генератор, имеют числа полюсов, связанные друг с другом соотношением

$$2p_1 + p_3 = p_2,$$

где  $p_1$  – число пар полюсов обмоток возбuditеля;  $p_2$  и  $p_3$  – соответственно числа пар полюсов АГ и ЭМТ.

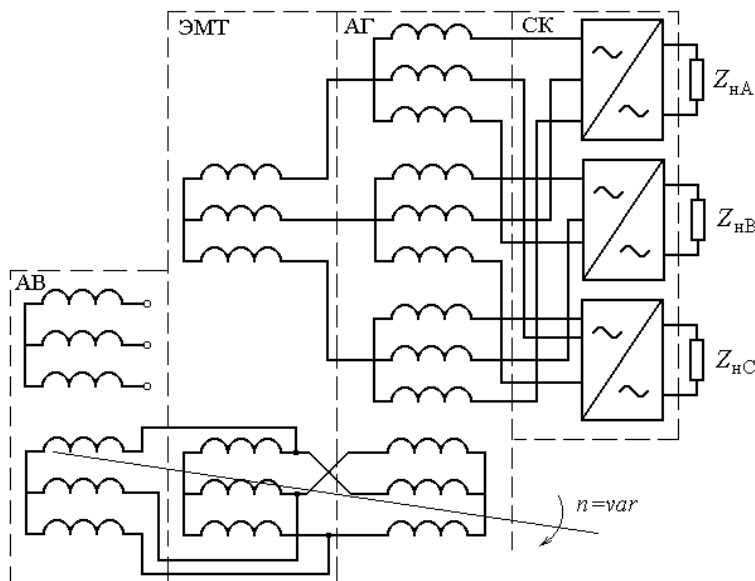


Рис. 2. Схема бесконтактного источника электропитания

Следует отметить, что машины, составляющие генератор, могут быть совмещены как по магнитным полям, так и по обмоткам. Для регулирования соотношения между выходными напряжениями ЭМТ и АГ может быть предусмотрено два отдельных для каждой машины канала регулирования. Это техническое решение позволяет, кроме магнитного и электрического совмещения машин, обеспечить самовозбуждение источника.

Анализируя электромагнитные процессы в трехфазном машинно-вентильном источнике стабильной частоты, необходимо учитывать наличие в схеме источника трех однофазных вентильных преобразователей. Это обстоятельство значительно усложняет расчеты, особенно при периодически изменяющейся амплитуде напряжения генератора [1].

Для любого однофазного вентильного преобразователя, работающего в машинно-вентильном источнике, справедливо уравнение [2]

$$\left| e_{ij} - e_{(i+1)(j+1)} \right| = 2x_k \frac{d|i_{ni}|}{d(\omega t)},$$

где  $e_{ij}$ ,  $e_{i(j+1)}$  – мгновенные значения фазных ЭДС генератора;  $x_k$  – коммутационное сопротивление фазы генератора.

Интегрируя на интервале коммутации, можно получить следующее соотношение:

$$1 - \cos \gamma_{\text{экв}} = \frac{2x_k I_{\text{нм}}}{\sqrt{3}U_{\text{м1}}},$$

где  $\gamma_{\text{экв}}$  – время, за которое эквивалентный ток генератора изменится от 0 до  $I_{\text{нм}}$ ;  $I_{\text{нм}}$  – модуль изображающего вектора тока нагрузки;  $U_{\text{м1}}$  – модуль изображающего вектора огибающей модулированного напряжения генератора.

Тогда угол сдвига фаз между основными гармоническими эквивалентного тока и напряжения генератора, определяемый коммутационным действием трех однофазных вентильных преобразователей, определится следующим образом:

$$\varphi_{\text{экв}} = \frac{1}{2} \left[ \arccos \left( 1 - \frac{2x_k I_{\text{нм}}}{\sqrt{3} U_{\text{мл}}} \right) \right]. \quad (2)$$

Уравнение внешней характеристики вентильного преобразователя, записанное в векторной форме:

$$\dot{U}_{\text{н}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \dot{U}_1 - \frac{3x_k}{\pi} \dot{i}_{\text{н}}, \quad (3)$$

где  $\dot{U}_{\text{н}}$  – изображающий вектор напряжения нагрузки источника;  $\dot{U}_1$  – изображающий вектор огибающей модулированного напряжения генератора;  $\dot{i}_{\text{н}}$  – изображающий вектор тока нагрузки.

Тогда, учитывая, что  $\dot{U}_{\text{н}} = p_{\text{т}}(L_{\text{н}} + L_{\text{к}})\dot{i}_{\text{н}} + \dot{i}_{\text{н}}R_{\text{н}}$ , и умножая уравнение (3) на координатный множитель  $e^{-j\omega_0 t}$ , получаем уравнение в векторной форме, описывающее переходные процессы в цепи нагрузки вентильного преобразователя в координатных осях  $\alpha$ ,  $\beta$ , вращающихся с частотой тока нагрузки:

$$(p_{\text{т}} + j\omega_0)(L_{\text{н}} + L_{\text{к}})\dot{i}_{\text{нс}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \dot{U}_{\text{г}} - \left( R_{\text{н}} + \frac{3x_k}{\pi} \right) \dot{i}_{\text{нс}},$$

где  $\dot{i}_{\text{нс}} = \dot{i}_{\text{н}} e^{-j\omega_0 t}$ ,  $\dot{U}_{\text{г}} = \dot{U}_1 e^{-j\omega_0 t}$  – соответственно изображающие векторы тока нагрузки и амплитуды напряжения генератора в синхронно вращающихся осях.

Обозначив  $x_k = L_k \omega_0$ ,  $x_{\text{н}} = L_{\text{н}} \omega_0$ ,  $\omega_1 = k\omega_0$  и  $\rho_{\text{н}} = \frac{\kappa(\pi R_{\text{н}} + 3x_k)}{\pi(\kappa x_{\text{н}} + x_k)}$ , получим уравнение,

описывающее преобразователь в синхронном (относительном) времени как в переходном, так и в установившемся режимах работы:

$$\frac{3\sqrt{3}\kappa}{\pi(\kappa x_{\text{н}} + x_k)} \dot{U}_{\text{г}} = (p_{\text{т}} + j + \rho_{\text{н}}) \dot{i}_{\text{нс}}.$$

Спектр тока фазы электромашинного генератора представляется как результаты модуляции соответствующего тока нагрузки коммутационной функцией, которые при  $m = 3$  определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f_{a1} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos kn\omega_0 t; \\ f_{a2} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left( kn\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ f_{a3} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left( kn\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} \right); \end{aligned} \right\}$$

где  $n = 6l \pm 1$ ;  $l = 1, 2, 3 \dots$

Если ток фазы  $A$  нагрузки  $i_{\text{нА}} = I_{\text{н}} \sin(\omega_0 t - \varphi_{\text{н}})$ , то фазные токи обмоток генератора  $i_{aq} = i_{\text{нА}} f_{aq}$ , где  $q$  – номер фазной обмотки генератора:

$$i_{aq} = \frac{4I_m}{\pi} \sin(\omega_0 t - \varphi_H) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{n} \cos \left[ kn\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} \right].$$

Очевидно, что реакция якоря в машинах, составляющих генератор, будет определяться эквивалентным током  $i_{\Sigma}$ , который находится как сумма токов обмоток, лежащих в одних пазах машины.

С учетом соответствующих коммутационных функций для АГ

$$i_{1\Sigma} = \frac{6I_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left[ (kn-1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} + \varphi_H \right].$$

С учетом угла сдвига фаз между основными гармоническими эквивалентного тока и напряжения генератора, обусловленного коммутацией вентилей, первая гармоника эквивалентного тока АГ

$$i'_{1\Sigma} = \frac{3\sqrt{3}I_m}{\pi} \cos \left[ (k-1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} + \varphi_H - \varphi_{\text{ЭКВ}} \right].$$

Эквивалентный ток машины, работающей в режиме ЭМТ:

$$i_{2\Sigma} = \frac{6I_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left[ (kn+1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} - \varphi_H \right]. \quad (4)$$

Первая гармоническая тока машины, работающей в режиме ЭМТ, с учетом угла коммутации вентилей

$$i'_{2\Sigma} = \frac{3\sqrt{3}I_m}{\pi} \cos \left[ (k+1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} - \varphi_H - \varphi_{\text{ЭКВ}} \right]. \quad (5)$$

Анализируя выражения (4) – (5), можно заметить, что низкочастотная модуляция эквивалентных токов при симметричной нагрузке источника отсутствует. Первые гармоники эквивалентных токов имеют частоты, равные частотам ЭДС машин, составляющих генератор. В выражении (5) для определения тока  $i_{1\Sigma}$  угол  $\varphi_H$  имеет знак, противоположный знаку для тока нагрузки и эквивалентного тока  $i_{2\Sigma}$ . Это обусловлено алгоритмом переключения вентилей преобразователя и означает, что нагрузка для машины, работающей в режиме асинхронного генератора (АГ), имеет активно-емкостный характер при активно-индуктивной нагрузке источника.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при симметричной нагрузке источника электрические машины генератора работают независимо друг от друга на нагрузку, параметры которой определяются передаточными характеристиками вентильного преобразователя, а также углами сдвига фаз между основными гармоническими фазных напряжений и эквивалентных токов машин.

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в трехфазном автономном источнике стабильной частоты, может быть записана в системе координат, вращающихся синхронно с изображающим вектором напряжения возбуждения генератора.

Применяя систему базовых величин Парка, после преобразований можно записать эту систему уравнений в виде, удобном для программирования:

- для вентильного преобразователя:

$$\left. \begin{aligned} p_{\tau} \dot{i}_{\text{H}} &= -(j + \rho_{\text{H}}) \dot{i}_{\text{H}} \frac{3\sqrt{3}\kappa}{\pi(\kappa x_{\text{H}} + x_{\text{K}})} \dot{e}_{\text{Г}}; \\ \varphi_{\text{ЭКВ}} &= \frac{1}{2} \left[ \text{arcCos} \left( 1 - \frac{2x_{\text{K}} I_{\text{HM}}}{\sqrt{3} E_{\text{m1}}} \right) \right]; \\ I_{\text{ms}} &= \frac{3\sqrt{3} \text{Sin} \varphi_{\text{ЭКВ}}}{\pi \varphi_{\text{ЭКВ}}} I_{\text{MH}}; \\ \varphi_1 &= \varphi_{\text{ЭКВ}} - \varphi_{\text{H}}; \quad \varphi_2 = \varphi_{\text{ЭКВ}} + \varphi_{\text{H}}; \\ z_{\text{ЭКВ}} &= \frac{E}{I_{\text{ms}}}; \quad \varphi_{\text{H}} = \text{arctg} \frac{x_{\text{H}}}{R_{\text{H}}}; \\ r_1 &= z_{\text{ЭКВ}} \text{Cos} \varphi_1; \quad r_2 = z_{\text{ЭКВ}} \text{Cos} \varphi_2; \\ x_1 &= z_{\text{ЭКВ}} \text{Sin} \varphi_1; \quad x_2 = z_{\text{ЭКВ}} \text{Sin} \varphi_2; \\ \rho_{\text{H}} &= \frac{\kappa(\pi R_{\text{H}} + 3x_{\text{K}})}{\pi(\kappa x_{\text{H}} + x_{\text{K}})}; \end{aligned} \right\}$$

- для электромашинного генератора:

$$\left. \begin{aligned} p_{\tau} \dot{M}_1 &= -(\rho'_{s1} - js_1) \dot{M}_1 + \rho'_{s1} \dot{N}_1; \\ p_{\tau} \dot{N}_1 &= -(\rho'_{r1} + j) \dot{N}_1 + \rho'_{r1} \mu_{c1} \dot{N}_1 + \rho_{r1} \dot{U}_{r1}; \\ p_{\tau} \dot{M}_2 &= -(\rho'_{s2} - js_2) \dot{M}_2 + \rho'_{s2} \dot{N}_2; \\ p_{\tau} \dot{N}_2 &= -(\rho'_{r2} + j) \dot{N}_2 + \rho'_{r2} \mu_{c2} \dot{M}_2 + \rho_{r2} \dot{U}_{r2}; \end{aligned} \right\}$$

- токи генератора:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{s1} &= \frac{\dot{M}_1 - \dot{N}_1}{(1 - \mu_{c1})(x_{d1} + x_1)}; \quad \dot{i}_{s2} = \frac{\dot{M}_2 - \dot{N}_2}{(1 - \mu_{c2})(x_{d2} + x_2)}; \\ \dot{i}_{r1} &= \frac{\dot{N}_1 - \mu_{c1} \dot{M}_1}{1 - \mu_{c1}}; \quad \dot{i}_{r2} = \frac{\dot{N}_2 - \mu_{c2} \dot{M}_2}{1 - \mu_{c2}}, \end{aligned}$$

где

$$\rho_{s1} = \frac{r_{s1} + r_1}{x_{d1} + x_1}; \quad \rho_{s2} = \frac{r_{s2} + r_2}{x_{d2} + x_2}; \quad \rho_{r1} = \frac{r_{r1}}{x_{r1}}; \quad \rho_{r2} = \frac{r_{r2}}{x_{r2}};$$

$$\mu_{c1} = \frac{x_{a1}^2}{(x_{d1} + x_1)x_{r1}}; \quad \mu_{c2} = \frac{x_{a2}^2}{(x_{d2} + x_2)x_{r2}}; \quad \rho'_{s1} = \frac{\rho_{s1}}{1 - \mu_{c1}};$$

$$\rho'_{s2} = \frac{\rho_{s2}}{1 - \mu_{c2}}; \quad \rho'_{r1} = \frac{\rho_{r1}}{1 - \mu_{c1}}; \quad \rho'_{r2} = \frac{\rho_{r2}}{1 - \mu_{c2}}; \quad s_1 = 1 - \kappa; \quad s_2 = 1 + \kappa,$$

где  $\dot{e}_{\text{Г}}$  – неискаженная ЭДС генератора;  $x_{a1}, x_{a2}$  – индуктивные сопротивления реакции якоря машин генератора;  $x_{d1}, x_{d2}$  – синхронные индуктивные сопротивления;  $x_{r1}, x_{r2}$  – индуктивные сопротивления обмоток возбуждения;  $r_{s1}, r_{s2}$  – активные сопротивления статорных обмоток;  $r_{r1}, r_{r2}$  – активные сопротивления обмоток ротора;  $s_1, s_2$  – скольжения асинхронных машин.

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\dot{i}_H = 0; \quad \dot{M}_1 = \frac{\dot{i}_{r10}}{s_1}; \quad \dot{N}_1 = \dot{i}_{r10}; \quad \dot{M}_2 = \frac{\dot{i}_{r20}}{s_2}; \quad \dot{N}_1 = \dot{i}_{r20}.$$

Векторы неискаженных ЭДС, которыми представлен генератор для вентильного преобразователя, определяются для каждой машины в любой момент времени:

$$\dot{e}_1 = \dot{\Psi}_{r1}; \quad \dot{e}_2 = \dot{\Psi}_{r2}.$$

Тогда вектор неискаженной ЭДС за индуктивным сопротивлением коммутации определится как сумма векторов ЭДС машин

$$\underline{\dot{e}}_1 = \dot{e}_1 + \dot{e}_2.$$

Решение системы уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты четвертого порядка. В качестве примера приведены расчетные кривые изменения во времени ЭДС, токов, напряжений и углов сдвига фаз при включении генератора на номинальную нагрузку с  $\cos \varphi_H = 0,8$  и  $E_{m1} = E_{m2}$  (см. рис. 3).

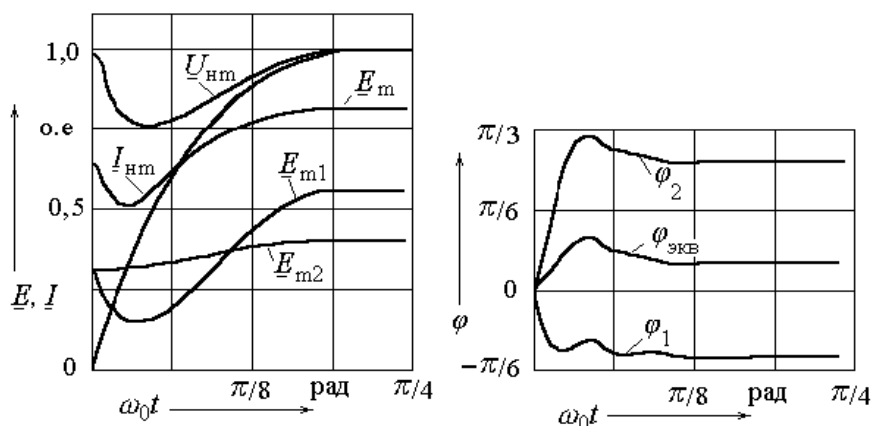


Рис. 3. Переходные процессы в автономном источнике питания при нагрузке

Анализ результатов расчета показал, что модуляционные процессы в генераторе при установившейся симметричной нагрузке источника отсутствуют, а параметры эквивалентной нагрузки генератора изменяются только во время переходного процесса в цепи нагрузки вентильного преобразователя. Следовательно, система возбуждения автоматического регулирования, балластная нагрузка, устройства электронагрева могут проектироваться без учета «низкочастотной» модуляции напряжения электрических машин, составляющих генератор.

Для подтверждения правильности результатов теоретических исследований были изготовлены физические модели рассмотренных источников питания, отличающиеся конструктивным исполнением, выходной мощностью и параметрами электромашинного генератора. Частота вращения генераторов изменялась в диапазоне от 3000 до 6000 об/мин. Экспериментальные установки имеют генераторы, выходной каскад которых состоит из двух машин, каждая из которых содержит по три трехфазных комплекта обмоток, что позволяет реализовать на макетных образцах любую из схем источников, предложенных автором. В качестве вентильного преобразователя использован преобразователь частоты с непосредственной свя-



зью (НПЧ), выполненный по мостовой схеме и с отдельным управлением вентильными комплектами.

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование предлагаемых источников электропитания в автономных энергосистемах позволяет формировать синусоидальное напряжение на нагрузке. Анализ формы кривых изменения напряжений и эквивалентных токов машин показывает, что «низкочастотные» модуляционные процессы в генераторе при установившейся симметричной нагрузке источника отсутствуют. Эквивалентные токи машин практически синусоидальны. Искажение формы напряжений машин, составляющих генератор, обусловлено только коммутационными процессами в вентильном преобразователе.

При этом предложенная схема автономного источника электропитания позволяет генерировать четыре системы переменных напряжений:

- 1) трехфазная система синусоидальных напряжений с частотой  $\omega_0$ , не зависящей от скорости вращения вала;
- 2) трехфазная система синусоидальных напряжений с переменной частотой  $\omega_1 - \omega_0$ , зависящей от скорости вращения вала;
- 3) трехфазная система синусоидальных напряжений с переменной частотой  $\omega_1 + \omega_0$ , зависящей от скорости вращения вала;
- 4) система модулированных напряжений с переменной несущей частотой  $\omega_1$ , зависящей от скорости вращения вала и стабильной частотой огибающей  $\omega_0$ , не зависящей от скорости вращения вала генератора

Следует отметить, что такие источники, как правило, используются в энергосистемах с относительно высокой частотой вращения первичного вала (дизельэлектростанции, подвижные объекты, системы с редуцированием частоты вращения и т.д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский, И. Н. Автономный источник переменного напряжения стабильной частоты на основе двухмашинного совмещенного генератора / И. Н. Дубровский, В. М. Кузьмин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (26). – Вып. 1. – С. 121-127.
2. Кузьмин, В. М. Работа НПЧ в трехфазном источнике стабильной частоты / В. М. Кузьмин, Ш. С. Ройз, А. И. Озга // Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Томск: Томский политехн. ин-т, 1984.
3. Патент на полезную модель № 82076 МПК H02M 5/48, H02K 29/00. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты / В. М. Кузьмин, И. Н. Дубровский, А. И. Якушкин (Россия) – 2008120578/22; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. – 2 с.

**Степанов А.Н**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

**Степанов А. Н**

**A. N. Stepanov**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

**SIMULATION OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF A THREE-PHASE  
ELECTRICAL MACHINE**



**Степанов Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, профессор, декан электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

**Mr. Anatoly N. Stepanov** – PhD in Engineering, Professor, Dean of the Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail [Prof.Stepanova@mail.ru](mailto:Prof.Stepanova@mail.ru).

**Аннотация.** В работе предложена упрощенная математическая модель для расчета внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины для оценки электромагнитного загрязнения и степени воздействия на человека.

**Summary.** The paper suggests a simplified mathematical model for calculating the external magnetic field of a three-phase electrical machine for the assessment of electromagnetic pollution and the extent of human exposure.

**Ключевые слова:** магнитное поле, трехфазная электрическая машина, упрощенная модель, электромагнитное загрязнение, действие на человека.

**Key words:** magnetic field, three-phase electrical machine, simplified model, electromagnetic pollution, effects on humans.

УДК 504.06:537

В настоящее время особенно актуально стоит задача по определению напряженности магнитного поля, создаваемого электротехническими устройствами во внешнем пространстве.

Во многих устройствах и приборах одним из основных непосредственных источников магнитного поля являются электрические машины.

Поле вокруг машины носит сложный характер, является трехмерным и, наряду с основной гармоникой, содержит довольно большое количество высших гармонических. Провести расчет такого поля путем решения тем или иным методом системы уравнений электромагнитного поля является достаточно сложной задачей. Таким образом, данная задача ставится тогда, когда необходимо определить внешнее магнитное поле специальных электрических машин, устанавливаемых на транспортных средствах и с целью решения вопроса, связанного с электромагнитной совместимостью. В случае, когда целью расчета такого поля является оценка электромагнитного загрязнения и степени воздействия на человека, представляется возможным использовать упрощенные математические модели.

В данной работе рассматривается одна из таких моделей. Так, известно, что в непосредственной близости от электрической машины переменного тока внешнее магнитное поле определяется статорной обмоткой и имеет то же число полюсов. По мере удаления от поверхности машины величина магнитного поля убывает, причем тем быстрее, чем большее

число полюсов имеет машина. Задача по моделированию магнитного поля двухполюсной обмотки наиболее просто может быть решена с помощью трех сосредоточенных катушек, уложенных в плоскостях под углом  $120^\circ$  друг к другу и по которым протекают токи, отличающихся по фазе также на  $120^\circ$ . Для определения поля от такой модели рассмотрим вначале расчет поля одной рамки, по которой протекает ток

$$i = I_m \sin \omega t.$$

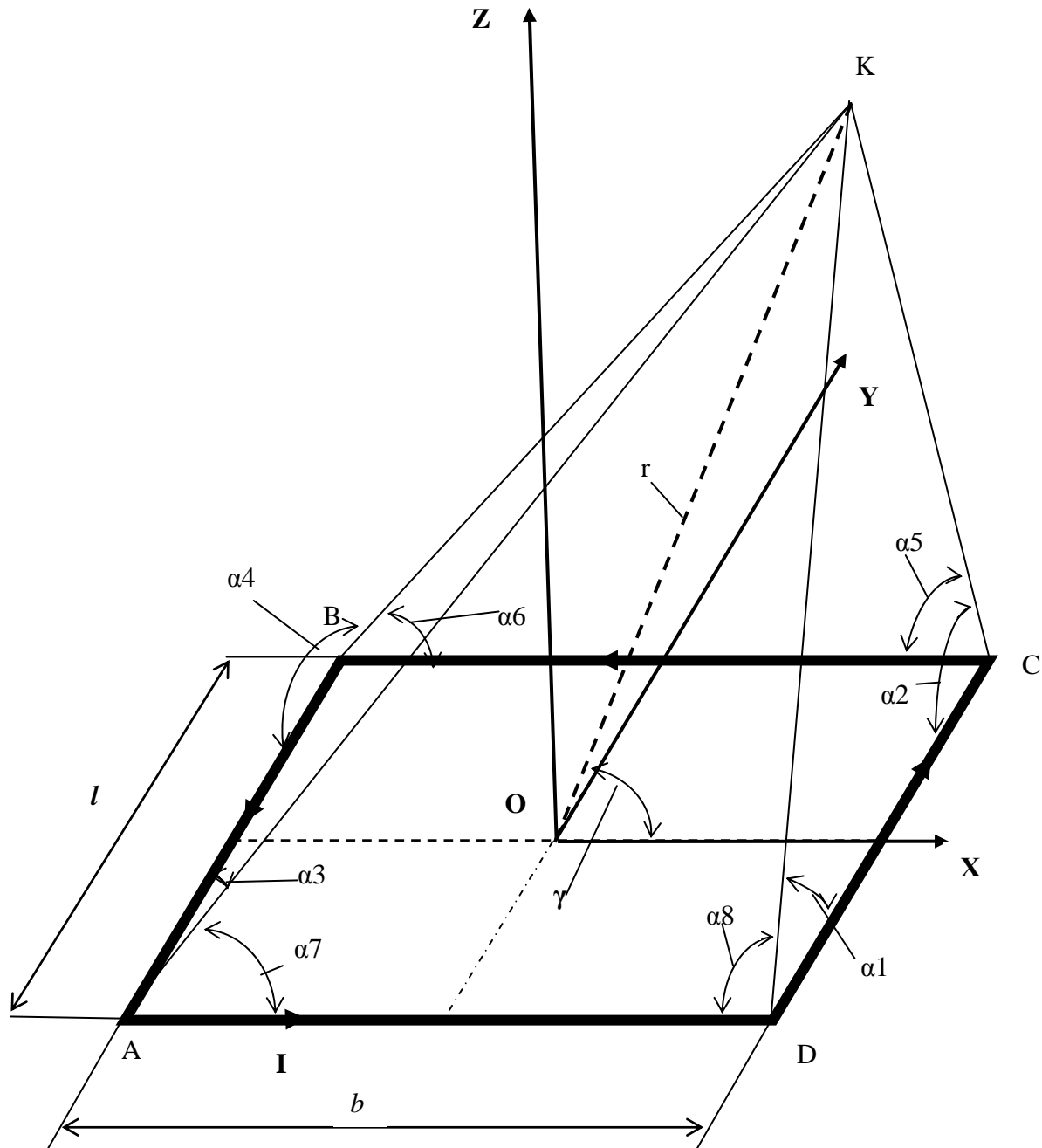


Рис. 1

Пусть рамка ABCD имеет размеры  $l \times b$  и ток в рамке направлен так, как показано на рис. 1. Для расчета поля в произвольной точке K будем использовать векторный потенциал и комплексный метод. Вначале определим комплексное значение векторного потенциала в точке K от каждого прямолинейного проводника с током, которые являются той или иной

стороной рамки, затем, с учетом того, что векторный потенциал направлен параллельно плотности тока, найдем суммарные составляющие векторного потенциала.

Так, составляющая векторного потенциала от отрезка DC с комплексным током  $\dot{I}$  направлена вдоль оси OY и определяется, как известно, с помощью следующего выражения:

$$A_{y1}(x, y, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (Arsh(ctg(\alpha_1)) + Arsh(ctg(\alpha_2))) = \\ = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left( Arsh \frac{0,5l + y}{\sqrt{z^2 + (0,5b - x)^2}} + Arsh \frac{0,5l - y}{\sqrt{z^2 + (0,5b - x)^2}} \right).$$

Здесь  $x, y, z$  – координаты произвольной точки К.

Составляющие векторного потенциала от отрезков BA, AD, BC, рамки ABCD с током  $\dot{I}$  будут соответственно равны:

$$A_{y2}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (Arsh(ctg(\alpha_3)) + Arsh(ctg(\alpha_4))) = \\ = -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left( Arsh \frac{0,5l + y}{\sqrt{z^2 + (0,5b + x)^2}} + Arsh \frac{0,5l - y}{\sqrt{z^2 + (0,5b + x)^2}} \right);$$

$$A_{x1}(x, y, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (Arsh(ctg(\alpha_7)) + Arsh(ctg(\alpha_8))) = \\ = \frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left( Arsh \frac{0,5b - x}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} + Arsh \frac{0,5b + x}{\sqrt{z^2 + (0,5l + y)^2}} \right);$$

$$A_{x2}(x, y, z) = -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} (Arsh(ctg(\alpha_5)) + Arsh(ctg(\alpha_6))) = \\ = -\frac{\mu_0 \dot{I}}{4\pi} \left( Arsh \frac{0,5b - x}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} + Arsh \frac{0,5b + x}{\sqrt{z^2 + (0,5l - y)^2}} \right);$$

Таким образом, суммарные составляющие векторного потенциала определяются следующим образом:

$$A_x(x, y, z) = A_{x1}(x, y, z) + A_{x2}(x, y, z);$$

$$A_y(x, y, z) = A_{y1}(x, y, z) + A_{y2}(x, y, z).$$

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля будут при этом равны:

$$H_{Ax}(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left( -\frac{\partial}{\partial z} A_y(x, y, z) \right);$$

$$H_{AY}(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial}{\partial z} A_x(x, y, z) \right);$$

$$H_{AZ}(x, y, z) = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial}{\partial x} A_y(x, y, z) - \frac{\partial}{\partial y} A_x(x, y, z) \right).$$

Модуль напряженности в произвольной точке  $K(x, y, z)$  определяется следующим образом:

$$|H_A(x, y, z)| = \sqrt{|(H_{AX}(x, y, z))|^2 + |(H_{AY}(x, y, z))|^2 + |(H_{AZ}(x, y, z))|^2}.$$

Рассмотрим теперь расчет поля от трех одинаковых рамок ABCD; EFMN и GHIL, расположенных в плоскостях под углом  $120^\circ$  друг к другу и по которым протекают комплексные токи  $I_A, I_B$  и  $I_C$  (рис. 2):

$$I_A = \dot{I}; \quad I_B = \dot{I}e^{-j2\pi/3}; \quad I_C = \dot{I}e^{j2\pi/3}.$$

Здесь  $j$  – мнимая единица.

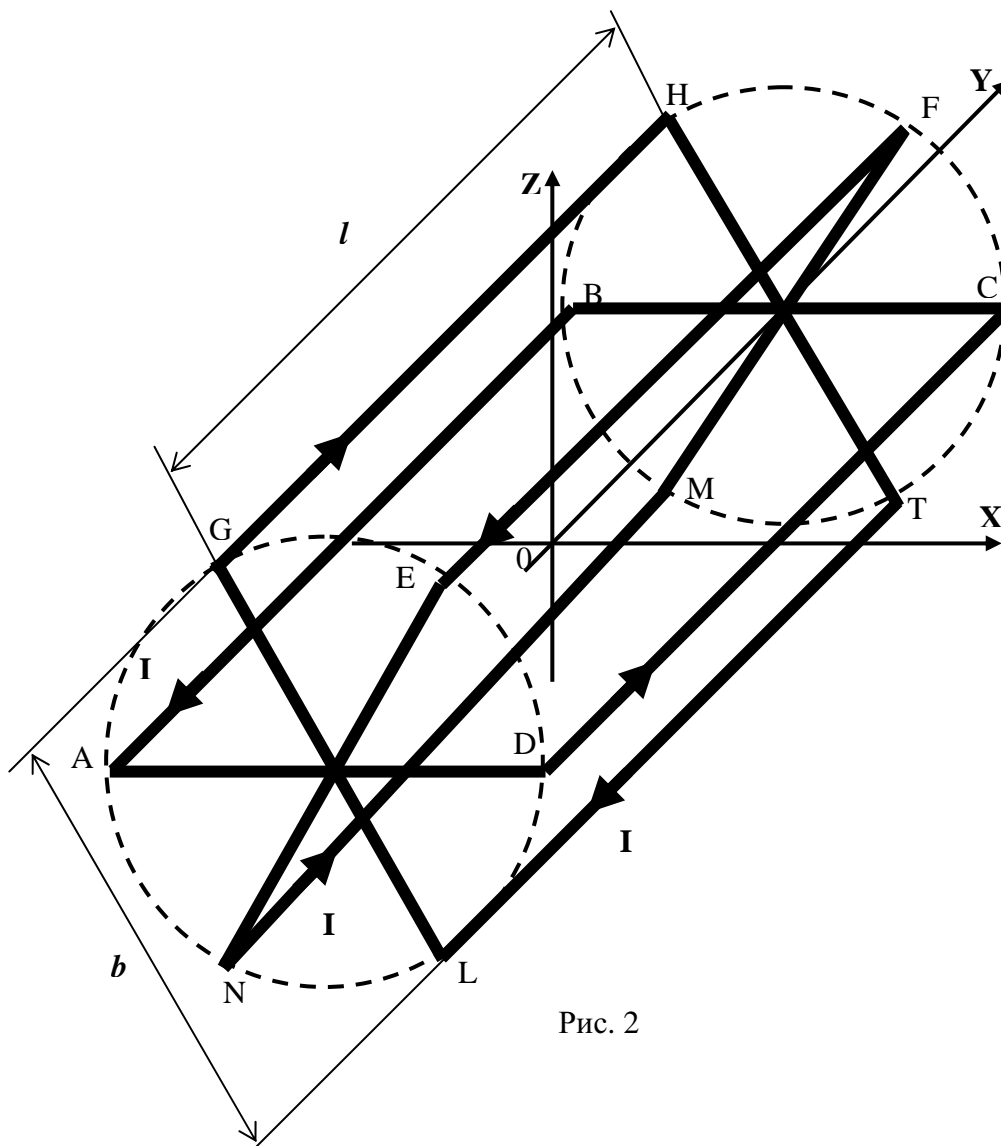


Рис. 2

Вначале проведем расчет поля в торцевой зоне при  $x = z = 0$  и  $y > 0,5l$ , т.е. для точек, лежащих на оси ОУ.

В этом случае напряженность магнитного поля от рамки ABCD с током  $I_A$  будет иметь одну составляющую  $H_{AZ}$ , направленную вдоль оси OZ, а напряженность магнитного поля от рамки EFMN с током  $I_B$  и рамки GHIL с током  $I_C$  – по две составляющие, направленные вдоль оси OZ и OX:

$$H_{BZ} = -H_{AZ} e^{-j2\pi/3} \sin \pi / 6; H_{BX} = -H_{AZ} e^{-j2\pi/3} \sin \pi / 3;$$

$$H_{CZ} = -H_{AZ} e^{j2\pi/3} \sin \pi / 6; H_{CX} = H_{AZ} e^{j2\pi/3} \sin \pi / 3.$$

Таким образом, суммарные составляющие напряженности магнитного поля, направленные вдоль оси OZ и оси OX, и модуль напряженности в торцевой зоне на оси ОУ будут соответственно равны:

$$H_Z = H_{AZ} (1 - e^{-j2\pi/3} \sin \pi / 6 - e^{j2\pi/3} \sin \pi / 6) = 1,5H_{AZ};$$

$$H_X = H_{AZ} \sin \pi / 3 (e^{j2\pi/3} - e^{-j2\pi/3}) = j1,5H_{AZ};$$

$$|H| = \sqrt{|H_Z|^2 + |H_X|^2} = 2,121|H_{AZ}|.$$

График изменения модуля напряженности магнитного поля в относительных единицах вдоль оси ОУ для  $b = l = 0,4$  м представлен на рис. 3. Причем за базисное значение напряженности поля (Нбу) принято значение напряженности на оси ОУ при  $y = 0,5l + 0,004$  м.

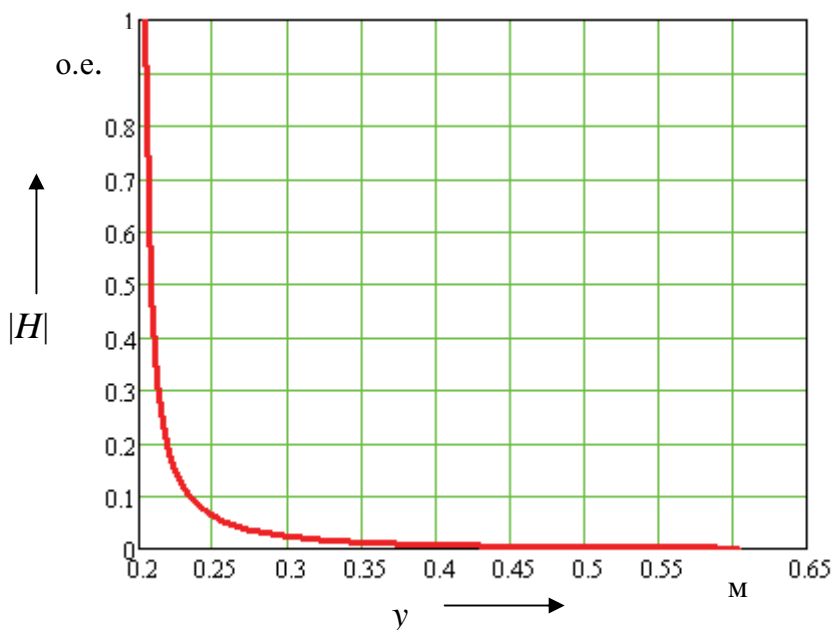


Рис. 3

Рассмотрим теперь расчет напряженности магнитного поля от трех рамок в радиальном направлении при  $y = z = 0$  и  $x > 0,5b$ .

В этом случае, так же как и в торцевой зоне, напряженность магнитного поля от рамки ABCD с током  $I_A$  будет иметь одну составляющую  $H_{AZ}$ , направленную вдоль оси OZ, а напряженность магнитного поля от рамки EFMN с током  $I_B$  и рамки GHIL с током  $I_C$  – по две составляющие, направленные вдоль оси OZ и OX:

$$H_{BZ}(x,0,0) = -H_{AZ}(x_B,0,z_B)e^{-j2\pi/3}(\sin \pi/6 + \sin \pi/3);$$

$$H_{BX}(x,0,0) = H_{AZ}(x_B,0,z_B)e^{-j2\pi/3}(\sin \pi/3 - \sin \pi/6);$$

$$H_{CZ}(x,0,0) = H_{AZ}(x_C,0,z_C)e^{j2\pi/3}(\sin \pi/3 - \sin \pi/6);$$

$$H_{CX}(x,0,0) = -H_{AZ}(x_C,0,z_C)e^{j2\pi/3}(\sin \pi/3 + \sin \pi/6).$$

Здесь  $x_B = -x \cdot \sin \pi/6$ ;  $z_B = x \cdot \sin \pi/3$ ;

$$x_C = -x \cdot \sin \pi/6; z_C = -x \cdot \sin \pi/3.$$

Таким образом, суммарные составляющие напряженности магнитного поля, направленные вдоль оси OZ и оси OX, и модуль напряженности в радиальном направлении на оси OX будут соответственно равны:

$$H_Z(x,0,0) = H_{AZ}(x,0,0) + H_{BZ}(x,0,0) + H_{CZ}(x,0,0);$$

$$H_X(x,0,0) = H_{BX}(x,0,0) + H_{CX}(x,0,0);$$

$$|H(x,0,0)| = \sqrt{|H_Z(x,0,0)|^2 + |H_X(x,0,0)|^2}.$$

График изменения модуля напряженности магнитного поля в относительных единицах вдоль оси OX для  $b = l = 0,4$  м представлен на рис. 4. Причем за базисное значение напряженности поля принято значение напряженности на оси OX при  $x = 0,5b + 0,004$  м.

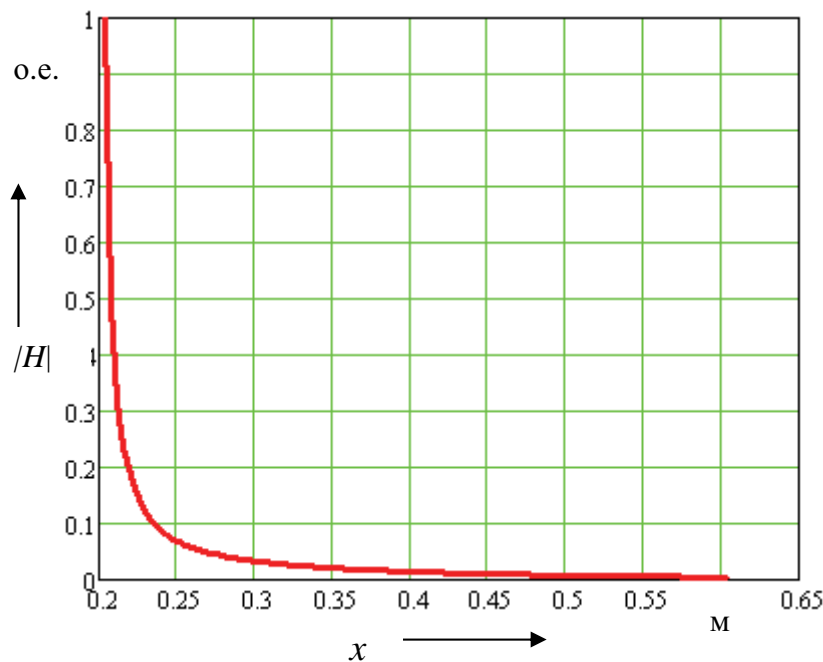


Рис. 4

Из сопоставления рис. 3 и рис. 4 можно сделать вывод, что характер изменения (при данных соотношениях размеров рамок  $l/b = 1$ ) модуля напряженности поля вдоль оси OX и оси OY примерно одинаков. Однако базисное значение напряженности поля в торцевой зоне ( $H_{бх}$ ) примерно в два раза ( $H_{бу}/H_{бх} = 2,13$ ) больше базисного значения на оси OX. Для других соотношений  $l/b$  величина  $H_{бу}/H_{бх}$  незначительно отличается (см. табл. 1) от данного значения. В этой же таблице приведено значение отношения  $H_{б\infty}/H_{бх}$ , где  $H_{б\infty}$  – модуль напряженности поля при  $x = 0,5b + 0,004$  м для случая, когда  $l = \infty$ .

Таблица 1

$l/b$	$H_{by}/H_{bx}$	$H_{b\infty}/H_{bx}$	$\beta_x$	$\beta_y$
0,5	2,16	1,037	4,152	3,347
1,0	2,13	1,017	3,515	4,713
2,0	2,11	1,006	3,097	7,526
3,0	2,10	1,003	3,004	10,369
4,0	2,10	1,002	2,980	13,222
5,0	2,10	1,001	2,972	16,079

Как видно из табл. 1, при  $l/b > 2$  отношение  $H_{by}/H_{bx}$  практически не изменяется, а базисное значение  $H_{bx} \approx H_{b\infty}$ , что позволяет определять  $H_{bx}$  из расчета поля для бесконечно длинной системы проводов. Кроме этого, характер изменения напряженности магнитного поля для системы бесконечно длинных проводов в зависимости от координаты  $x$  оказывается примерно таким же (см. рис. 5), как и для системы из трех рамок, поэтому и оценку поля можно проводить по более простым выражениям.

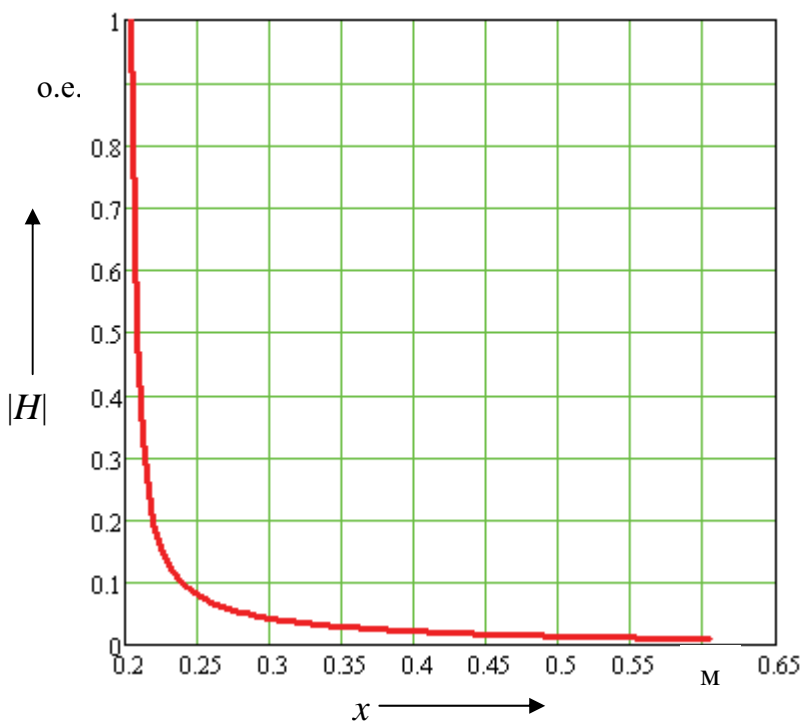


Рис. 5

Получим теперь выражения, с помощью которых можно аппроксимировать кривые, представленные на рис. 3 – 5.

В качестве таких аппроксимирующих выражений возьмем следующие формулы для модуля напряженности поля на оси ОХ ( $H_{xa}$ ), оси ОУ ( $H_{ya}$ ) и оси ОХ для бесконечно длинной системы проводов ( $H_{\infty a}$ ):

$$H_{xa} = \left( \frac{x\bar{b}}{x} \right)^{\beta_x} ; \quad H_{ya} = \left( \frac{y\bar{b}}{y} \right)^{\beta_y} ; \quad H_{\infty a} = \left( \frac{x\bar{b}}{x} \right)^{\beta_{\infty}}$$

Здесь  $x\bar{b}$  и  $y\bar{b}$  – те значения координат, при которых определяются базисные значения напряженности магнитного поля.

$$\beta_x = -\frac{\ln|H(xt,0,0)|}{\ln\left(\frac{xt}{xb}\right)}; \quad \beta_y = -\frac{\ln|H(0,yt,0)|}{\ln\left(\frac{yt}{yb}\right)}; \quad \beta_\infty = -\frac{\ln|H_\infty(xt,0)|}{\ln\left(\frac{xt}{xb}\right)},$$

где  $xt$  и  $yt$  – значения координат, при которых точно совпадают аппроксимирующее и аппроксимируемое выражения;  $H_\infty(x,z)$  – напряженность поля, определяемая для бесконечно длинной системы проводов.

В табл. 1 представлены значения  $\beta_x$  и  $\beta_y$  в зависимости от соотношения  $l/b$ . Для бесконечно длинных проводников системы  $\beta_\infty = 2,968$ .

На рис. 6 показаны графики изменения модулей напряженности поля  $|H|$  в торцевой зоне и  $|H(x,0,0)|$  в радиальной зоне в зависимости от расстояния от центра системы при  $l/b = 1$ , а также графики изменения соответствующих аппроксимирующих функций  $H_{ya}$  и  $H_{xa}$ .

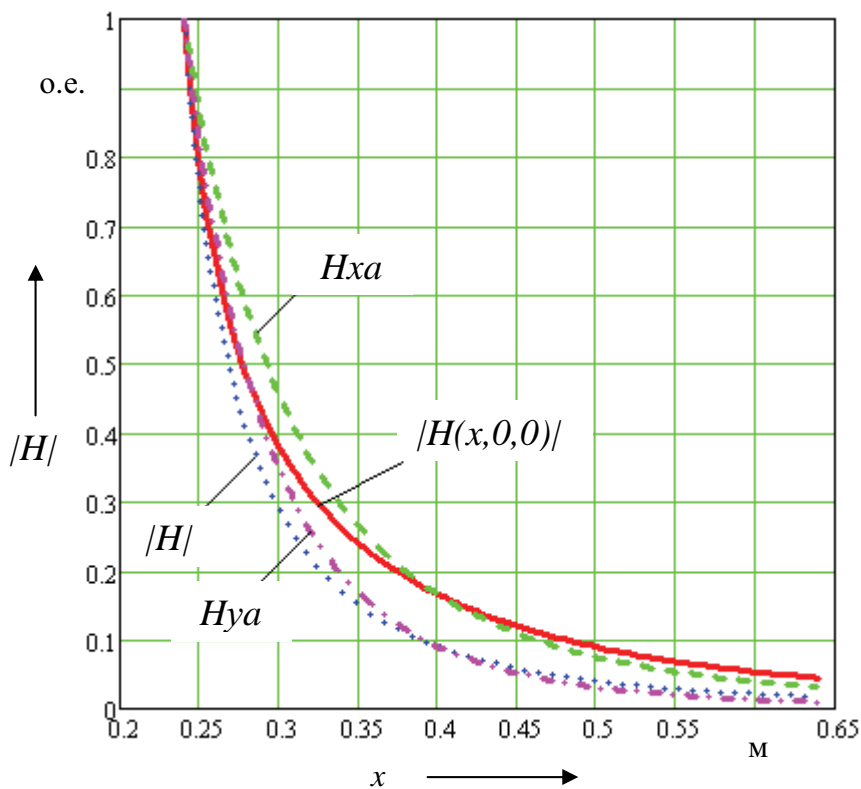


Рис. 6

Как видно из рис. 6, совпадение между аппроксимирующими и аппроксимируемыми функциями достаточно хорошее. Поэтому полученные выражения можно использовать для оценки электромагнитного загрязнения от трехфазных систем, для чего полученные тем или иным способом (например, с помощью непосредственных измерений) значения напряженностей магнитного поля на поверхности машины необходимо умножить на соответствующую функцию  $H_{ya}$  или  $H_{xa}$ . При этом, в зависимости от соотношения  $l/b$ , значения  $\beta_x$  и  $\beta_y$  следует брать из табл. 1.

**Петухов А.М., Кузьмин В.М., Дубровский И. Н.**  
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

**Петухов А. М., Кузьмин В. М., Дубровский И. Н.**  
**A.M. Petukhov, V.M. Kuzmin , I.N. Dubrovskiy**

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ**

**CALCULATION OF THE PARAMETERS OF A COMBINED POWER GENERATOR IN A SELF-CONTAINED AC POWER SUPPLY AT STABLE FREQUENCY**



**Петухов Анатолий Михайлович** – соискатель кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Anatoly M. Petukhov** – PhD Applicant, Department of Electro Mechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



**Кузьмин Вячеслав Матвеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav M.Kuzmin** - Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electro Mechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



**Дубровский Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Igor N. Dubrovsky** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Military Training Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен расчет параметров совмещенного электромашинного генератора в автономном источнике электрического тока.

**Summary.** The paper presents the calculation of parameters of a combined power generator in a self-contained power supply.

**Ключевые слова:** автономное электропитание.

**Key words:** self-contained power supply.

УДК 621.311:621.314.5

В настоящее время автономные источники переменного тока стабильной частоты (АИПТСЧ) применяются в различных отраслях промышленности и народном хозяйстве. Некоторые технические решения таких источников являются довольно распространенными, но они, к сожалению, не в полной мере способны удовлетворить все возрастающие к ним эксплуатационные требования. Это обстоятельство стимулирует процесс разработки и внедре-

ния новых вариантов таких источников, который не обошел стороной и Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, где на кафедре «Электромеханика» исследуется в настоящее время одно из новых технических решений АИПТСЧ, краткий расчет некоторых параметров которого представлен ниже.

Автономный источник состоит из двух асинхронных машин (см. рис. 1), установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе [1, 229]. Роторные обмотки машин подключены к роторной обмотке асинхронного возбудителя (АВ) таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая – в режиме асинхронного генератора (АГ). Статорная обмотка ЭМТ выполнена в виде обычной трехфазной обмотки. На статоре АГ расположено три идентичных трехфазных обмотки, уложенных в одни и те же пазы. Выводы выходной обмотки ЭМТ подключены к нулевым точкам статорных обмоток АГ. Статорная обмотка АВ, который установлен на одном валу с АГ и ЭМТ, подключена к нагрузке через фазосдвигающее устройство (ФСУ).

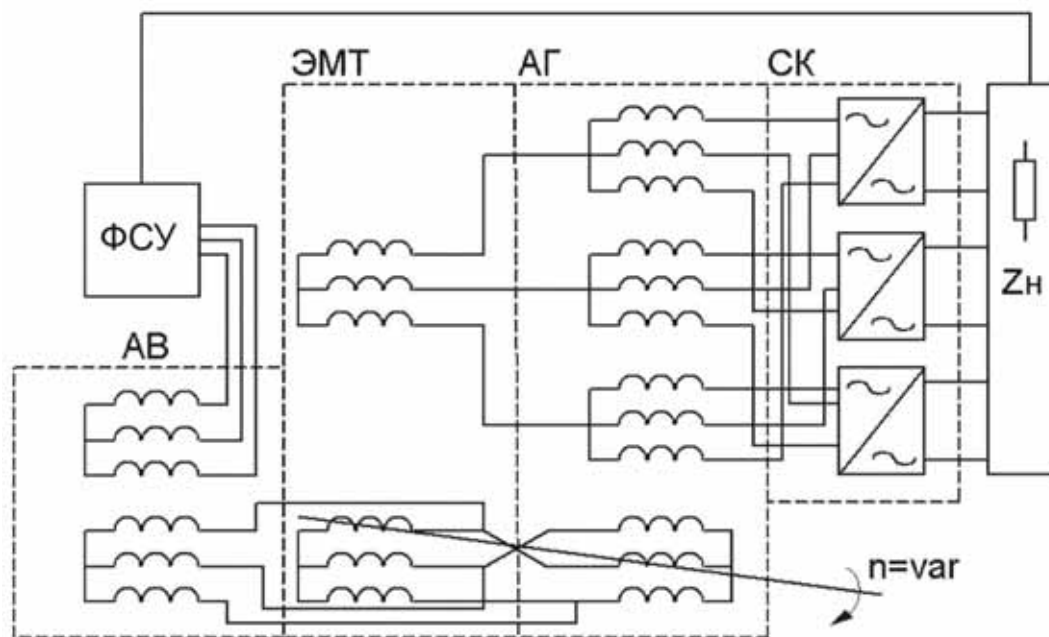


Рис. 1. Трехфазный автономный источник стабильной частоты на основе двух асинхронных машин с асинхронным возбудителем

Устройство работает следующим образом. При питании обмотки АВ от ФСУ переменным током стабильной частоты  $\omega_1$  и вращении вала с угловой частотой  $\omega$  в роторной обмотке возбудителя наводится ЭДС, изменяющаяся с угловой частотой

$$\omega_6 = \omega_1 - \omega p_1,$$

где  $p_1$  – число пар полюсов обмотки возбудителя.

Нагрузкой для роторной обмотки возбудителя являются роторные обмотки ЭМТ и АГ. В статорных обмотках этих машин наводятся ЭДС с угловыми частотами

$$\omega_2 = \omega (p_2 - p_1) + \omega_1, \quad \omega_3 = \omega (p_3 + p_1) - \omega_1,$$

где  $p_2$  и  $p_3$  – число пар полюсов ЭМТ и АГ соответственно.

Для получения напряжения стабильной частоты используем биения выходного напряжения электромашинного генератора при сложении ЭДС близких частот.

Частота биений определяется следующим образом:

$$\omega_b = \omega_2 - \omega_3 = \omega (2p_1 - p_2 + p_3) + 2\omega_1. \quad (1)$$

В этом выражении два слагаемых: одно зависит от частоты тока возбуждения, а другое – от частоты вращения вала. Так как нам необходимо, чтобы частота биений не зависела от частоты вращения вала, то должно выполняться условие  $\omega(2p_1 - p_2 + p_3) = 0$ , из которого получаем, что

$$2p_1 + p_3 = p_2. \quad (2)$$

Будем считать, что при равенстве амплитуд ЭДС ЭМТ и АГ для образования биений достаточным будет выполнение следующего соотношения:

$$\frac{\omega_3}{\omega_b} \geq 8,$$

тогда

$$\omega(p_3 + p_1) - \omega_1 \geq 8 \times 2\omega_1,$$

откуда найдем

$$\omega_{\min} = \frac{17\omega_1}{p_3 + p_1}, \quad (3)$$

где  $\omega_{\min}$  – минимальная частота вращения вала, при которой будут формироваться биения.

Таким образом, для того чтобы получить на выходе рассматриваемой системы напряжение стабильной частоты, необходимо выполнить условия:

$$\begin{cases} \omega \geq \left( \omega_{\min} = \frac{17\omega_1}{p_3 + p_1} \right); \\ 2p_1 + p_3 = p_2 \end{cases} \quad (4)$$

Для расчета образующихся гармонических составляющих необходимо определиться с количеством пазов на роторе и статоре, шагом обмоток, числом пазов на полюс и фазу.

Кроме того, будем рассматривать такие соотношения между количеством пазов и пар полюсов, чтобы число пазов на полюс и фазу  $q$  было целым числом – это необходимо как для удобства выполнения обмоток, так и для исключения возможности возникновения дополнительных гармонических составляющих.

Обмотки выполним трехфазными симметричными с фазной зоной  $\alpha = 60^\circ$ . Для определения возможных вариантов соотношения  $Z$ ,  $p$  и  $q$  рассмотрим обобщенное уравнение

$$q = \frac{Z}{6p}. \quad (5)$$

График зависимости  $q$  от  $p$  при некоторых фиксированных значениях  $Z$  представлен на рис. 2.

Из графиков видно, что для каждого фиксированного  $Z$  количество узловых точек (с целым  $q$  и  $p$  – выделены точками) ограничено и возрастает с ростом  $Z$  (для кратных  $Z$ ).

С учетом изложенного выше для АИПТСЧ малой и средней мощности при соблюдении условий (2) и (5) параметры  $Z$ ,  $q$ ,  $p$  представлены в табл. 1.

В табл. 1 приведены минимальные значения для количества пазов статора и ротора  $Z_{cmin}$  и  $Z_{pmin}$  соответственно при заданном количестве пар полюсов для каждой машины.

Для изготовления АИПТСЧ с необходимым соотношением пар полюсов может быть применена электрическая машина с количеством пазов  $Z_c$  и  $Z_p$ , вычисленными по формуле

$$Z = Z_{\min} + kp_2, \quad (6)$$

где  $k$  – целое число.

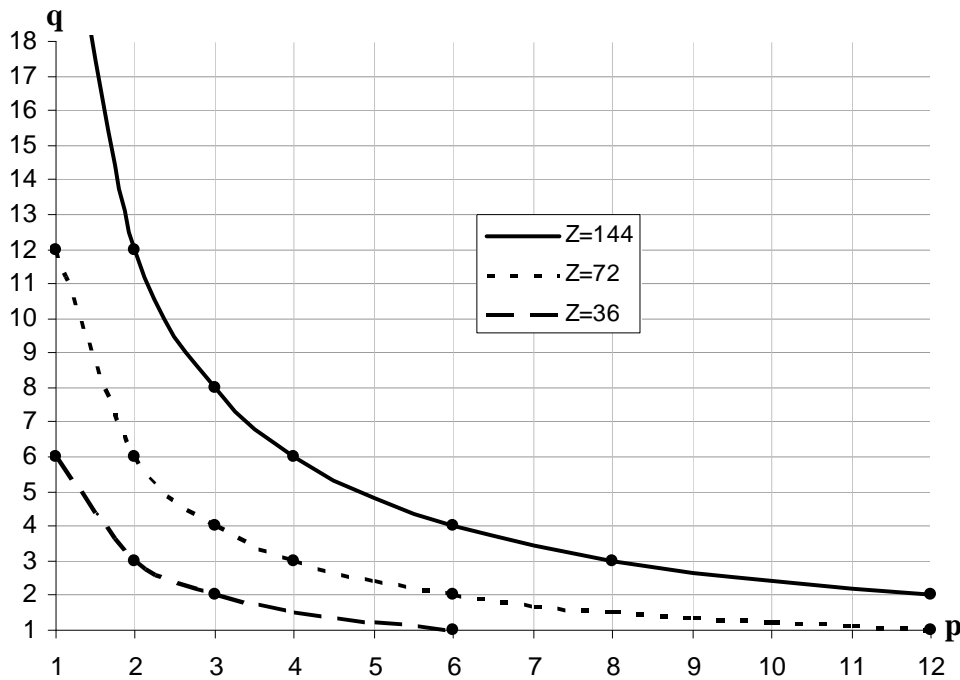


Рис. 2. Зависимость  $q$  от количества пар полюсов для фиксированного количества пазов  $Z$

Таблица 1

Параметры АИПТСЧ малой и средней мощности

Параметр	Значения параметров для возможных вариантов					
$p_1$	1	1	1	1	2	2
$p_2$	3	3	4	4	5	6
$p_3$	1	1	2	2	1	2
$Z_{cmin}$	72	108	96	144	120	144
$Z_{pmin}$	36	72	48	96	60	72
$q_{2C}$	4	6	4	6	4	4
$q_{2P}$	2	4	2	4	2	2
$q_{3C}$	12	18	8	12	20	12
$q_{3P}$	6	12	4	8	10	6

В связи с тем, что обмотки АГ и ЭМТ уложены в одном магнитопроводе, то для эффективной их совместной работы необходимо исключить взаимно-индуктивную связь между ними [2, 88].

Допустим, что обмотки выполнены трехфазными однослойными с диаметральными шагами  $y_3 = \tau_3 = 3\tau_2$  и  $y_2 = \tau_2$ , где  $\tau_3$  и  $\tau_2$  – полюсные деления полей  $\Phi_3$  ( $p_3 = 1$ ) и  $\Phi_2$  ( $p_2 = 3$ ).

Рассмотрим сначала условия работы обмотки 3 ( $2p_3 = 2$ ) в магнитном поле  $\Phi_2$  ( $2p_2 = 6$ ).

Электродвижущие силы, наводимые в катушечных группах обмотки 3 полями  $\Phi_3$  и  $\Phi_2$ , сдвинуты на углы:

$$\alpha_{33} = \frac{360}{3} p_3 = 120^\circ \text{ – в поле } \Phi_3; \alpha_{32} = \frac{360}{3} p_2 = \alpha_{33} \frac{p_2}{p_3} = 360^\circ \text{ – в поле } \Phi_2.$$

Следовательно, ЭДС, наводимые в каждой фазе (катушечной группе) обмотки 3 полем  $\Phi_2$ , совпадают по фазе, а значения их зависят от шага обмотки 3 и ее расположения в поле  $\Phi_2$ :

$$E_{32} \sim K_{y32} K_{p32} \Phi_2,$$

где  $K_{y12}$  – коэффициент укорочения;  $K_{p12}$  – коэффициент распределения катушечной группы обмотки 1 в поле  $\Phi_2$ ;

$$K_{y32} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_3}{\tau_2}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_3}{\tau_3} \cdot 3\right), \quad K_{p32} = \frac{\sin\left(q_3 \cdot \frac{\alpha_{32}}{2}\right)}{q_3 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{32}}{2}\right)} = \frac{\sin\left(q_3 \cdot \frac{\alpha_{33}}{2} \cdot 3\right)}{q_3 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{33}}{2} \cdot 3\right)}.$$

При  $y_3 = \tau_3$  имеем

$$K_{y32} K_{p32} \neq 0, \quad E_{32} \neq 0,$$

т.е. однослойная обмотка 3 имеет индуктивную связь с полем  $\Phi_2$  и такую обмотку нельзя соединить в треугольник, так как в замкнутом контуре треугольника под действием ЭДС  $3E_{32}$  будут протекать паразитные токи и нормальная работа обмотки будет нарушена. При соединении такой обмотки в звезду (без вывода нулевой точки) вредное действие ЭДС  $E_{32}$  устраняется, так как на линейных выводах обмотки 3 ЭДС  $E_{32}$  геометрически вычитаются и дают нулевую сумму. Электродвижущую силу  $E_{32}$  можно устранить путем выполнения обмотки 3 двухслойной с укороченным на  $\tau_2$  шагом, т. е. с  $y_3 = \tau_3 - \tau_2 = 2/3\tau_3$ , тогда

$$K_{y32} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3\right) = \sin(\pi) = 0, \quad E_{32} = 0,$$

Таким образом, двухслойная обмотка 3 с числом полюсов  $2p_3 = 2$  и шагом  $y_3 = 2/3\tau_3 = 2\tau_2$  индуктивно с полем  $\Phi_2$  обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) не связана и ее можно соединять как звездой, так и треугольником. В такой обмотке можно выполнять одну или две параллельные ветви.

Теперь рассмотрим условия работы обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) в магнитном поле  $\Phi_3$  ( $2p_3 = 2$ ). Электродвижущие силы, наводимые в катушечных группах однослойной обмотки 2 полями  $\Phi_3$  и  $\Phi_2$ , сдвинуты на углы:

$$\alpha_{22} = \frac{360}{9} p_2 = 120^\circ \text{ – в поле } \Phi_2; \quad \alpha_{23} = \frac{360}{9} p_3 = \alpha_{22} \frac{p_3}{p_2} = 40^\circ \text{ – в поле } \Phi_3.$$

Следовательно, ЭДС, наводимые в катушечных группах обмотки 2 полем  $\Phi_3$ :

$$E_{23} \sim K_{y23} K_{p23} \Phi_3 \neq 0,$$

$$K_{y23} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_2}{\tau_3}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_2}{\tau_2} \cdot \frac{1}{3}\right) \neq 0, \quad K_{p23} = \frac{\sin\left(q_2 \cdot \frac{\alpha_{23}}{2}\right)}{q_2 \sin\left(\frac{\alpha_{23}}{2}\right)} = \frac{\sin\left(q_2 \cdot \frac{\alpha_{22}}{2} \cdot \frac{1}{3}\right)}{q_2 \sin\left(\frac{\alpha_{22}}{2} \cdot \frac{1}{3}\right)} \neq 0.$$

Таким образом, в каждой катушечной группе обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) поле  $\Phi_3$  наводит ЭДС  $E_{21} \neq 0$ , которую невозможно устранить ни укорочением шага, ни распределением катушки. Однако ЭДС фазы  $E_{\phi 23}$  можно свести к 0 путем соединения обмотки 2 в одну параллельную ветвь. Действительно, ЭДС  $E_{23}$  катушечных групп одной фазы сдвинуты в поле  $\Phi_3$  на углы  $3\alpha_{23} = 120^\circ$  и при последовательном их соединении в фазе сумма ЭДС  $E_{\phi 23} = 0$ .

Следовательно, фазы обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) индуктивно не связаны с полем  $\Phi_3$  обмотки 3 ( $2p_3 = 2$ ), хотя отдельно взятые катушки (катушечные группы) обмотки 2 такую связь с полем  $\Phi_3$  имеют. Обмотку 2 можно соединить как звездой, так и треугольником с ограничением для нее по числу параллельных ветвей ( $a = 1$ ).

Итак, обмотки 3 и 2 асинхронного совмещенного электромашинного генератора с  $p_3 = 1$  и  $p_2 = 3$  взаимно-индуктивно друг с другом не связаны, если обмотка 3 ( $p_3 = 1$ ) выполнена двухслойной с шагом  $y_3 = 2/3\tau_3$ , а обмотка 2 ( $p_2 = 3$ ) соединена в одну параллельную ветвь.

Обмотку ЭМТ выполним трехфазной симметричной с фазной зоной  $\alpha = 60^\circ$  и относительным шагом обмотки  $\beta = 5/6$ .



Для проведения исследований предлагаемого устройства используется имеющаяся на кафедре электрическая машина с параметрами, близкими к тем, что указаны во втором столбце табл. 1. Эта машина имеет зубцов ровно в два раза меньше – 54 паза на статоре и 36 – на роторе. Различия параметров при таком выборе электрической машины приведены в табл. 2.

Полученные результаты исследований в пределах допустимых погрешностей можно будет считать достоверными.

Для оценки влияния обмотки на уровень гармонических составляющих используем обмоточные коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$k_{on} = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{6}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{6q}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\beta \pi n}{2}\right),$$

где  $n = 1, 3, 5, 7$  – кратность частоте основной гармоники.

Таблица 2

Параметры обмоток совмещенного электромашинного генератора

Параметры электрической машины	108/72	54/36
Количество пар полюсов АВ, $p_1$	1	1
Количество пар полюсов ЭМТ, $p_2$	3	3
Количество пар полюсов АГ, $p_3$	1	1
Количество пазов статора (ротора), $Z$ , пазов	108 (72)	54 (36)
Кол-во катушек в группе для статора ЭМТ, $q_{ЭМТс}$ , пазов	6	3
Кол-во катушек в группе для ротора ЭМТ, $q_{ЭМТр}$ , пазов	4	2
Кол-во катушек в группе для статора АГ, $q_{АГс}$ , пазов	18	9
Кол-во катушек в группе для ротора АГ, $q_{АГр}$ , пазов	12	6
Полюсное деление, $\tau_{ЭМТс}$ , пазов	18	9
Полюсное деление, $\tau_{ЭМТр}$ , пазов	12	6
Полюсное деление, $\tau_{АГс}$ , пазов	54	27
Полюсное деление, $\tau_{АГр}$ , пазов	36	18
Шаг обмотки статора (ротора) ЭМТ, $y_{ЭМТс}$ ( $y_{ЭМТр}$ ), пазов	15 (10)	7 (5)
Обмоточный коэффициент статора (ротора) ЭМТ для:		
основной гармоники, $k_{об1ЭМТс}$ ( $k_{об1ЭМТр}$ )	0,924(0,925)	0,902(0,933)
3-й гармоники, $k_{об3ЭМТс}$ ( $k_{об3ЭМТр}$ )	-0,455(-0,462)	-0,333(-0,5)
5-й гармоники, $k_{об5ЭМТс}$ ( $k_{об5ЭМТр}$ )	0,051(0,053)	-0,038(0,067)
7-й гармоники, $k_{об7ЭМТс}$ ( $k_{об7ЭМТр}$ )	-0,038(-0,041)	-0,136(-0,067)
Шаг обмотки статора (ротора) АГ, $y_{АГс}$ ( $y_{АГр}$ ), пазов	36 (24)	18 (12)
Обмоточный коэффициент статора (ротора) АГ для:		
основной гармоники, $k_{об1АГс}$ ( $k_{об1АГр}$ )	0,827 (0,827)	0,827 (0,828)
3-й гармоники, $k_{об3АГс}$ ( $k_{об3АГр}$ )	0 (0)	0 (0)
5-й гармоники, $k_{об5АГс}$ ( $k_{об5АГр}$ )	-0,166 (-0,167)	-0,168 (-0,171)
7-й гармоники, $k_{об7АГс}$ ( $k_{об7АГр}$ )	-0,119 (-0,12)	-0,121 (-0,126)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов, А. М. Автономный источник электропитания переменного тока стабильной частоты / А. М. Петухов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Электротехнические комплексы и системы». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – 300 с.
2. Попов, В. И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты / В. И. Попов. – М.: Энергия. – 175 с.

**Приходченко О.В.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

**Приходченко О. В.  
O.V. Prikhodchenko**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ**

**MATHEMATICAL MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC AND HEAT PROCESSES IN THE ELECTROMECHANICAL HEAT-PRODUCING CONVERTERS**



**Приходченко Оксана Вадимовна** – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681014, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Калинина, 41-40; 8(4217)26-64-80, 89141859358. E-mail: [okpr68@mail.ru](mailto:okpr68@mail.ru).

**Ms. Oksana V. Prikhodchenko** – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur); address: apartment 40, 41, Kalinin street, Komsomolsk-on-Amur, home: 26-64-80, mob.: 89141859358, E-mail: [okpr68@mail.ru](mailto:okpr68@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты экспериментального и численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в теплогенерирующих электромеханических преобразователях. Приведены выражения для нахождения отдельных составляющих потерь. Проводится анализ влияния основных конструктивных элементов и их размерных соотношений на выходную температуру преобразователя.

**Summary.** The paper considers the results of experimental and numerical modelling of electromagnetic and heat processes in the electromechanical heat-producing converters. Equations are suggested to calculate individual loss components. The analysis of the impact of basic structural components and their geometrical ratios on the output converter temperature is carried out.

**Ключевые слова:** моделирование, ферромагнитный элемент, температурное поле.

**Key words:** modelling, ferromagnetic component, temperature field.

УДК 539.3

### **Общие положения**

Электромеханические преобразователи переменного тока (ЭМП) на сегодняшний день являются одним из самых распространенных элементов энергетических систем различного целевого назначения. Особую актуальность использованию асинхронных ЭМП дает интенсивное развитие преобразователей частоты, позволяющих не только эффективно регулировать скорость вращения, но и обеспечивать энергосберегающие режимы работы за счет оптимальных алгоритмов управления потреблением электроэнергии, использующих интеллектуальные технологии (нечеткая логика, нейронные сети, нейронечеткие подходы). В свою очередь, это еще в большей степени расширяет область применения ЭМП и, в частности, позволяет исследовать режимы работы, связанные с использованием традиционных электромеханических преобразователей переменного тока в качестве теплогенерирующих устройств, характеризующихся повышенными коэффициентами теплоотдачи и теплопроизводительностью.

Несмотря на конструкционное подобие обычным электрическим машинам переменного тока, теплогенерирующие электромеханические преобразователи (ТЭМП) имеют ряд таких принципиальных отличий, как наличие неподвижного нагревательного элемента (НЭ),



установленного на капсулированном статоре, и вращающегося нагревательного элемента (ВЭ) в виде полого немагнитного ротора, на котором закреплены напорные лопасти. Более подробно конструктивные исполнения ТЭМП описаны в [1, 74-86]. Необходимость применения НЭ обусловлена тем, что при наличии вращающегося тепловыделяющего элемента, который, по существу, является короткозамкнутой обмоткой асинхронного двигателя, в режимах, близких к синхронным, количество тепловых потерь, выделяющихся во ВЭ, в значительной степени уменьшается вследствие сближения скоростей вращения магнитного поля и подвижного элемента. Поэтому для обеспечения требуемой теплопроизводительности, а также с целью компенсации влияния на выходные параметры ТЭМП скорости вращения вторичной обмотки в конструкцию устройства вводятся добавочные источники тепла, показатели которых в меньшей степени связаны со скоростью вращения подвижного элемента, например, как в статических электронагревателях трансформаторного типа.

Очевидно, что основной особенностью ТЭМП как устройства для перемещения нагреваемой среды является малое гидравлическое сопротивление, обусловленное отсутствием вала и традиционных подшипниковых узлов. В то же время такая конструкция при отсутствии ферромагнитных элементов (ФЭ) во внутренней расточке статора характеризуется значительным намагничивающим реактивным током и потребляемой мощностью, вызывающими существенный нагрев неподвижной части ТЭМП, низким коэффициентом мощности и невысоким вращающим моментом.

Основной задачей при определении размерных соотношений таких ФЭ является обеспечение минимального гидравлического сопротивления проточной части ТЭМП при требуемом в электромагнитном отношении сечении ферромагнитных элементов. Поскольку, как и в обычном ЭМП, величина основного магнитного потока определяет магнитную индукцию в зазоре и, как следствие, при допустимом значении индукции (обычно не более 1,9...2,1 Тл) минимальную ширину зубца статора, то и толщина ФЭ может быть предварительно выбрана равной этой величине. Сравнительный анализ результатов численного моделирования с проектными параметрами ТЭМП подтверждает возможность выбора толщины ферромагнитного элемента исходя из электромагнитного расчета статора преобразователя. В частности, для исследованного варианта ТЭМП мощностью 2,2 кВт при номинальном фазном напряжении 220 В, частоте 50 Гц, коэффициенте мощности (без преобразователя частоты) 0,349, температуре рабочей среды 85 °С, производительности 0,025 м<sup>3</sup>/мин, давлении 0,01 МПа при использовании электротехнической стали 2013 ГОСТ 21427.2-83 с толщиной листа 0,5 мм и коэффициенте заполнения сталью 0,95 ширина зубца статора составляет приблизительно 4 мм, а для существенного снижения магнитного сопротивления достаточно установки ФЭ толщиной не менее 2 мм.

Более сложно определяется осевая длина ФЭ, так как она не только изменяет распределение магнитного поля во внутренней области ТЭМП, но и влияет на процесс теплоотдачи с поверхности НЭ вследствие изменения гидравлического сопротивления между неподвижным и вращающимся нагревательными элементами. Для исследования влияния длины ФЭ на параметры опытного образца ТЭМП был проведен ряд экспериментов с использованием тороидальных ферромагнитных шихтованных элементов из электротехнической стали 2013 длиной 20 и 60 мм при длине вращающегося элемента 100 мм. Полученные результаты позволяют определить относительный диапазон длин ФЭ, составляющий приблизительно 0,25...0,70 длины ВЭ, в котором достигается снижение сопротивления намагничивающего контура без существенного ухудшения теплоотдачи.

### **Электромагнитные процессы в ТЭМП**

Для анализа электромагнитных процессов ТЭМП можно рассматривать в виде вращающегося преобразователя переменного тока с двумя вторичными обмотками: неподвижным и подвижным полюсами роторами. Для описания электромагнитных процессов при неизменности распределения магнитного поля и потоков мощности реальный преобразователь,

имеющий число витков первичной обмотки  $w_1$ , вторичных обмоток  $w_2$  и  $w_3$ , заменяется эквивалентным с числом витков во вторичных обмотках, равным числу витков первичной обмотки, для инвариантности активной и реактивной составляющих мощности изменяются полные сопротивления вторичных обмоток. Связь между реальными и приведенными параметрами с учетом числа фаз и обмоточных коэффициентов обмоток устанавливают выражения:

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 &= \dot{I}_2 \cdot \frac{m_2 w_2 k_{обм2}}{m_1 w_1 k_{обм1}}; & \dot{I}'_3 &= \dot{I}_3 \cdot \frac{m_3 w_3 k_{обм3}}{m_1 w_1 k_{обм1}}; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{U}_2 \cdot \frac{w_1 k_{обм1}}{w_2 k_{обм2}}; & \dot{U}'_3 &= \dot{U}_3 \cdot \frac{w_1 k_{обм1}}{w_3 k_{обм3}}; \\ \dot{Z}'_2 &= \dot{Z}_2 \cdot \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{w_1 k_{обм1}}{w_2 k_{обм2}} \right)^2; & \dot{Z}'_3 &= \dot{Z}_3 \cdot \frac{m_1}{m_3} \left( \frac{w_1 k_{обм1}}{w_3 k_{обм3}} \right)^2, \end{aligned}$$

где  $\dot{I}_2, \dot{I}_3$  – токи неподвижной и вращающейся вторичных обмоток реального преобразователя в комплексной форме;  $\dot{I}'_2, \dot{I}'_3$  – токи неподвижной и вращающейся вторичных обмоток приведенного преобразователя;  $\dot{Z}_2, \dot{Z}_3$  – комплексные сопротивления неподвижной и вращающейся вторичных обмоток реального преобразователя;  $\dot{Z}'_2, \dot{Z}'_3$  – комплексные сопротивления неподвижной и вращающейся вторичных обмоток приведенного преобразователя;  $m_1, m_2, m_3$  – число фаз первичной, неподвижной и вращающейся вторичных обмоток;  $k_{обм1}, k_{обм2}, k_{обм3}$  – обмоточные коэффициенты.

Ток первичной обмотки  $\dot{I}_1$  увеличивается при нагрузке по сравнению с холостым ходом на суммарную величину приведенных токов неподвижной и вращающейся вторичных обмоток:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - (\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3).$$

Теоретически при заданном напряжении токи во всех электрических цепях определяются их полными сопротивлениями, так первичная обмотка включает активное  $r_1$  и индуктивное  $x_{1L}$  сопротивления, неподвижная вторичная обмотка – активное  $r'_2$ , индуктивное  $x'_{2L}$  и емкостное  $x'_{2C}$  приведенные сопротивления, вращающаяся вторичная обмотка – приведенные активное  $r'_{3S}$ , индуктивное  $x'_{3LS}$  и емкостное  $x'_{3CS}$  сопротивления. Однако в реальных преобразователях толщина стенок полого немагнитного ротора (неподвижного и вращающегося нагревательных элементов) во много раз меньше глубины проникновения электромагнитного поля, поэтому можно предположить, что индуктивное сопротивление рассеяния полых роторов  $x'_{2L}, x'_{3L}$  мало и вихревые токи при любых скольжениях распределяются по толщине стенок ротора практически равномерно, поэтому можно допустить, что приведенное активное сопротивление  $r'_3$  не зависит от скольжения.

Это позволяет приближенно найти нагрузочную составляющую потребляемого тока  $\dot{I}'_{23}$ , определяющего электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , передаваемую со стороны статора и обеспечивающую два процесса – нагрев теплоносителя неподвижным нагревательным элементом и нагрев и перемещение вращающимся нагревательным элементом.

Взаимодействие индуцированного во вторичных обмотках тока с магнитным полем дает выражение для электромагнитного момента  $M_{эм}$ , приложенного к ВЭ:

$$M_{эм} = \frac{m_3 P}{\sqrt{2}} \Psi_{3m} I_3 \sin \alpha,$$

где  $\Psi_{3m}$  – максимальное значение полного потокосцепления магнитного поля в зазоре с вращающимся нагревательным элементом;  $p$  – число полюсов;  $\alpha$  – угол между током  $\dot{I}_3$  и полным потокосцеплением  $\dot{\Psi}_{3m}$ .

Из этого выражения видно, что для создания электромагнитного момента из внешней (первичной) сети требуется подводить мощность, часть которой, за вычетом магнитных в статоре и электрических потерь в первичной обмотке, передается через немагнитный зазор на элементы вторичной цепи и является электромагнитной мощностью, пропорциональной моменту  $M_{эм}$  и угловой скорости поля  $\omega_1$ :

$$P_{эм} = M_{эм} \times \omega_1.$$

Механическая мощность  $P_{2мех}$  определяется соответствующей плотностью мощности, воспринимаемой поверхностью ВЭ как произведение тангенциального механического напряжения на тангенциальную окружную скорость, и обеспечивает напор и производительность устройства, а тепловая  $P_{2тепл}$ , равная сумме потерь в элементах ТЭМП, – температуру нагреваемого теплоносителя. Нахождение тепловой мощности связано с определением электрических, магнитных и дополнительных потерь в преобразователе.

Электрические потери в первичной обмотке определяются по формуле

$$P_{эл} = m_1 I_1^2 r_{10} (1 + \varepsilon_1 \Theta + \varepsilon_2 \Theta^2 + \dots + \varepsilon_n \Theta^n),$$

где  $r_{10}$  – активное сопротивление фазы первичной обмотки в практически холодном состоянии при начальной температуре;  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  – температурные коэффициенты сопротивления материала первичной обмотки в рабочем диапазоне температур;  $\Theta$  – температура первичной обмотки;  $n$  – степень полинома, аппроксимирующего зависимость ( $n = 1$  при  $\Theta 0 \dots 100$  °С,  $n = 2$  при  $\Theta 0 \dots 300$  °С и т.д.).

Возможность применения ТЭМП при питании первичной обмотки от источника переменного напряжения повышенной частоты требует учета неравномерного распределения плотности тока по сечению проводников первичной обмотки из-за поверхностного эффекта. Поэтому определение электрических потерь по активному сопротивлению  $r_{10}$ , полученному для одинаковой плотности тока по сечению, справедливо только для постоянных токов и токов малой частоты (порядка нескольких герц).

Неравномерность распределения тока зависит от величины поля рассеяния в пазу, силовые линии которого практически перпендикулярны оси паза, вследствие этого сцепление поля с элементами проводника, расположенными на одной высоте паза, определяет одинаковые индуктивные сопротивления таких элементов. В то же время индуктивные сопротивления элементов, находящихся на разной высоте паза, будут разными. Увеличение плотности тока происходит по мере приближения к поверхности паза, соответственно, полезное сечение уменьшается, а активное сопротивление возрастает. Для количественной оценки на практике используют коэффициент увеличения сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта, зависящий от частоты тока и геометрии проводника.

Нахождение магнитных потерь  $P_{1магн}$  требует учета технологических факторов, вида перемагничивания (пульсации или вращение поля) и добавочных составляющих. Практически для расчета используются удельные магнитные потери, например  $q_{1,0/50}$ , измеренные экспериментально при частоте 50 Гц и индукции магнитного поля 1 Тл. Пересчет на другие частоты и индукции требует разделения магнитных потерь на гистерезис, прямо пропорциональные частоте, и потери на вихревые токи, зависящие от квадрата частоты питающего напряжения:

$$q_{магн} = q_{гист} \frac{f}{50} B^2 + q_{вихр} \left( \frac{f}{50} \right)^2 B^2,$$

где  $q_{магн}$  – удельные магнитные потери при частоте  $f$  и индукции  $B$ ;  $q_{гист}$  – удельные магнитные потери от гистерезиса при частоте  $f = 50$  Гц и индукции  $B = 1$  Тл;  $q_{вихр}$  – удельные магнитные потери на вихревые токи при частоте  $f = 50$  Гц и индукции  $B = 1$  Тл.

Увеличение магнитных потерь из-за причин технологического характера учитывается эмпирическими коэффициентами технологических потерь  $K_{техн}$ , которые зависят от того, в какой части магнитопровода определяются магнитные потери. Суммарный коэффициент технологических потерь для ярма магнитопровода составляет 1,3...1,6, для зубцов – 1,7...1,8.

**Приходченко О.В.**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ**

Добавочные магнитные потери, обусловленные несинусоидальностью от высших гармонических составляющих индукции, учитываются коэффициентом добавочных потерь  $K_{доб}$ , принимаемым 1,2...1,3. С учетом этого величина магнитных потерь определится выражением

$$P_{магн1} = K_{техн} \cdot K_{доб} \cdot q_{магн} \cdot m_{магн},$$

где  $m_{магн}$  – масса магнитопровода или его участка.

Электрические потери в неподвижном нагревательном элементе  $P_{эл2}$  являются основным источником нагрева рабочей среды. Аналитическое исследование электромагнитных полей в НЭ с учетом его формы, закономерностей распределения токов и физических свойств сред требует ряда допущений, которые сформулированы в [3, 39-42]: при анализе поля рассматриваются только первые пространственные гармонические намагничивающей силы; величина воздушного зазора во много раз меньше внешнего диаметра; плотность тока постоянна по толщине цилиндра, образующего ротор; в распределении напряженности поля учитывается только нормальная составляющая; магнитная проницаемость стали равна бесконечности; индукция за пределами пакета статора равна нулю. Для обобщения поля в токовой и бестоковой областях вводится векторный потенциал, записываются уравнения Максвелла, а затем Лапласа для бестоковых областей и Пуассона для зоны вихревых токов. Из решения этих уравнений определяются векторный потенциал, поле и плотность вихревого тока. Электрическая мощность, выделяемая в НЭ, определяется действительной частью вектора Умова-Пойтинга:

$$P_{эл2} = 4pB_{\Delta}^2 \tau^3 f^2 l_{нэ} \rho_{нэ}^{-1} \Delta_{нэ} \left(1 - \frac{1}{\frac{\pi l_{нэ}}{4\tau} (\operatorname{cth} \frac{\pi l_{нэ}}{4\tau})}\right),$$

где  $B_{\Delta}$  – магнитная индукция;  $\tau$  – полюсное деление;  $f$  – частота питающей сети;  $l_{нэ}$  – активная длина неподвижного нагревательного элемента;  $\rho_{нэ}$  – удельное электрическое сопротивление НЭ;  $\Delta_{нэ}$  – толщина НЭ.

Электрические потери во вращающемся нагревательном элементе  $P_{эл3}$ , зависящие от его углового перемещения, определяются формулой:

$$P_{эл3} = 4pB_{\Delta}^2 \tau^3 s^2 f^2 l_{вэ} \rho_{вэ}^{-1} \Delta_{вэ} \left(1 - \frac{1}{\frac{\pi l_{вэ}}{4\tau} (\operatorname{cth} \frac{\pi l_{вэ}}{4\tau})}\right),$$

где  $l_{вэ}$  – активная длина вращающегося нагревательного элемента;  $\rho_{вэ}$  – удельное электрическое сопротивление ВЭ;  $\Delta_{вэ}$  – толщина цилиндра, образующего ВЭ;  $s$  – скольжение.

Магнитные потери  $P_{магн2}$ , имеющие место в традиционных электромеханических преобразователях, в ТЭМП без ферромагнитных элементов во вторичных цепях практически равны нулю. При использовании ферромагнитных элементов они определяются аналогично потерям  $P_{магн1}$ .

Определение добавочных потерь  $P_{доб}$  связано с необходимостью учета влияния высших гармоник электромагнитного поля ТЭМП и токов вторичных цепей  $I_2$  и  $I_3$ . Добавочные потери имеют место не только в неподвижном магнитопроводе, но и в маломощных элементах (вторичные обмотки, торцевые крышки и т.п.). Практически эти потери в электромеханических преобразователях оцениваются приближенно, что связано с их относительно небольшими величинами (обычно принимают 0,5 % от подводимой или отдаваемой мощности в зависимости от режима работы), но в большей степени с высокой сложностью их точного расчета. Определение добавочных потерь представляет отдельную задачу, связанную с нахождением распределения электромагнитного поля в конструктивных элементах преобразователя.

Дополнительные потери обусловлены наличием вращающегося нагревательного элемента и подразделяются на гидравлические  $\Delta P_{гидравл}$ , которые включают ударные  $P_{ударн}$ , геометрические  $P_{геом}$  и дифференциальные  $P_{дифф}$ , и потери механические  $\Delta P_{мех}$ , состоящие из дисковых потерь  $P_{диск}$  и потерь гидравлического торможения  $P_{гидр.торм}$ . Точное определение

этих потерь необходимо для нахождения температуры рабочей среды и требует отдельного исследования гидромеханических процессов в рабочей зоне ТЭМП. При инженерных расчетах эти потери учитываются коэффициентами, зависящими от конструктивных параметров и эксплуатационных факторов, аналогично тому, как это принято при анализе напорных характеристик вентиляторов или насосов [2, 202-213].

Гидравлический коэффициент полезного действия равен:

$$\eta_{гидр} \approx 1 - \frac{0,42}{(\lg(4500 \sqrt{\frac{Q}{n_{ВЭ} \eta_{об}}}) - 0,172)^2},$$

где  $n_{ВЭ}$  – скорость вращения ВЭ;  $Q$  – производительность.

Приближенное значение  $\eta_{гидр}$  составляет 0,85...0,96.

Механический коэффициент полезного действия (обычно 0,92...0,96) рассчитывается по коэффициенту быстроходности  $n_s$ :

$$\eta_{мех} = \frac{1}{1 + 820 n_s^{-2}}.$$

С учетом количества ступеней  $N$ , образующих вращающуюся часть ТЭМП, и заданного давления  $H$  коэффициент быстроходности находится по выражению:

$$n_s = 3,65 n_{ВЭ} \sqrt[4]{\frac{Q^2 N^3}{H^3}}.$$

Объемные потери определяются объемным коэффициентом полезного действия, который рассчитывается по формуле

$$\eta_{об} = \frac{1}{1 + 0,68 n_s^{-0,66}}.$$

Объемное сжатие теплоносителя вращающимся нагревательным элементом ТЭМП, на котором размещены  $z$  напорных лопастей, учитывается коэффициентом объемного сжатия:

$$k_Q = 1 - \frac{0,73 z_{ВЭ} \Delta_{ВЭ}}{D_2 - D_1},$$

где  $D_2, D_1$  – соответственно наружный и внутренний диаметры ВЭ.

Коэффициент объемного сжатия составляет 0,85...0,95.

Для учета снижения давления из-за конечного числа напорных лопастей используется коэффициент  $k_H$ , составляющий 0,7...0,9 и определяемый по формуле

$$k_H = 1 - u_2^2 \frac{\pi}{H z_{ВЭ}} \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \sin \beta_2,$$

где  $u_2$  – тангенциальная скорость на выходе ВЭ;  $\beta_2$  – угол установки лопасти на выходе.

С учетом конечного числа лопастей ВЭ и объемного сжатия теплоносителя механическая мощность, необходимая для обеспечения заданных значений  $H$  и  $Q$ , определится уравнением

$$P_{2,мех} = \frac{\rho g H_D Q_D}{k_H k_Q \eta_{об} \eta_{гидр} \eta_{мех}},$$

где  $H_D$  – действительное значение давления с учетом конечного числа напорных лопастей;  $Q_D$  – действительное значение производительности с учетом объемного сжатия теплоносителя;  $g$  – ускорения свободного падения;  $\rho$  – плотность нагреваемой среды.

Для количественного анализа электромагнитных процессов в ТЭМП было проведено численное моделирование с использованием пакета Comsol Multiphysics, представляющем собой интерактивную среду для моделирования и расчетов задач, сводящихся к дифференциальным уравнениям в частных производных, методом конечных элементов. Постановка задачи заключается в выборе требуемого физического раздела, определении расчетной об-

ласти, описании физических свойств подобластей и задании требуемых граничных условий. Введенные параметры задачи (физические свойства и граничные условия) преобразуются в коэффициенты математических уравнений автоматически.

При расчете магнитного поля использована двумерная модель магнитного поля переменных токов, протекающих перпендикулярно сечению нагревателя. Задача сводится к дифференциальному уравнению в частных производных относительно комплексной величины  $z$  – компоненты векторного магнитного потенциала  $A$ . Все расчеты приведены для частоты 50 Гц.

Источником магнитного поля является плотность стороннего тока (амплитудное значение), рассчитываемая из уравнения:

$$J_{\phi_m} = \frac{\sqrt{2}I_{\phi} \cdot n}{S_{\text{паза}}},$$

где  $I_{\phi}$  – фазный ток;  $n$  – число проводников в пазу;  $S_{\text{паза}}$  – площадь паза.

Ниже приводятся результаты расчета, полученные при различной толщине  $d$  ферромагнитного элемента с магнитной проницаемостью  $\mu_{\text{ФЭ}} = 500$ . Магнитная проницаемость магнитопровода статора  $\mu_1 = 1000$ .

Анализ распределения индукции магнитного поля вдоль средней линии полюса статора (см. рис.1) показывает, что величина магнитной индукции существенно зависит от наличия ФЭ во внутренней области статора ТЭМП и достигает значений, характерных для обычных электромеханических преобразователей переменного тока даже при использовании ФЭ минимальной толщины  $\Delta$ . В то же время изменение толщины ФЭ от 2 до 5 мм практически не влияет на магнитные характеристики ТЭМП, что позволяет сделать вывод о нецелесообразности применения ФЭ толщиной, превышающей расчетную ширину зубцов статора, получаемую по результатам электромагнитного расчета [4, 245-258].

Полученные результаты не только показывают влияние размерных отношений основных конструктивных элементов на электромагнитные величины, но и позволяют перейти к определению температур в элементах преобразователя.

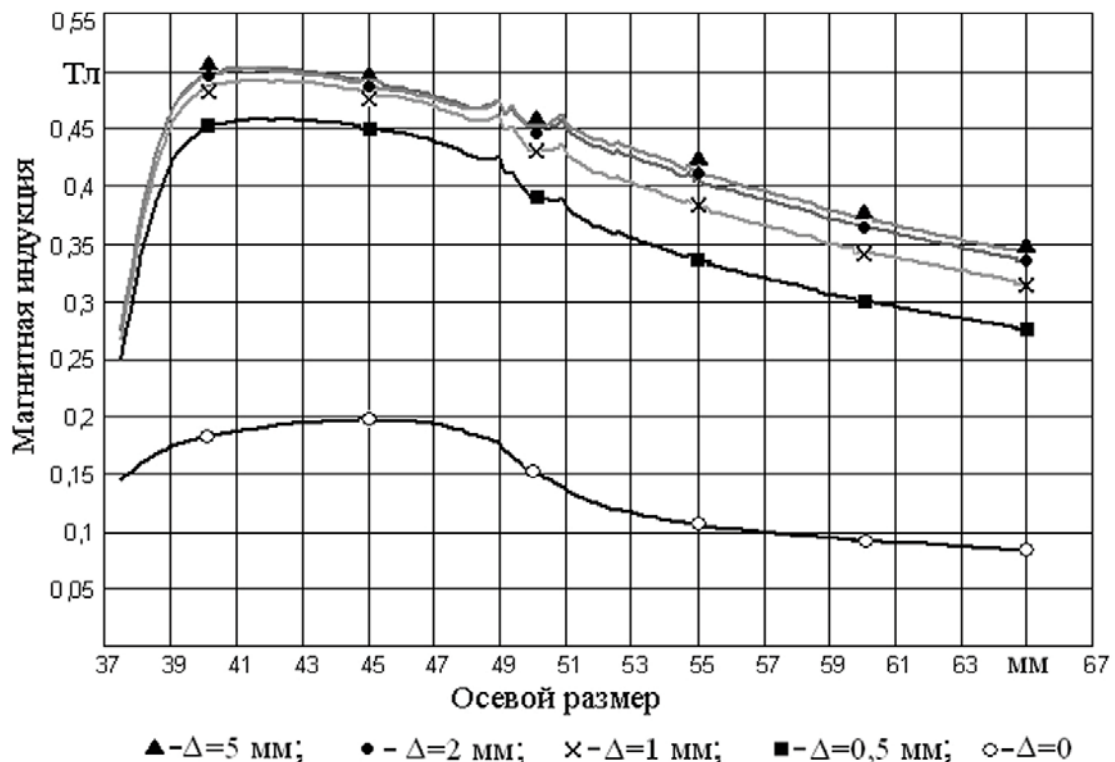


Рис. 1. Изменение индукции магнитного поля вдоль зубца статора

### Тепловые параметры ТЭМП

Основным результатом электромагнитного расчета является определение значений объемного тепловыделения в элементах ТЭМП, которые используются в задаче теплопроводности в качестве источников тепла. Следует отметить, что тепловыделением в ФЭ можно пренебречь, поскольку, как показали расчеты, мощность тепловыделения в них на порядок меньше, чем в электрически активной части ВЭ. Определение суммарных тепловых мощностей статора, НЭ и ВЭ позволяет найти температуру нагреваемого теплоносителя. Считая, что при номинальных режимах основным источником тепла в ТЭМП является НЭ, для которого известна тепловая мощность, необходимо учесть, что на нагрев теплоносителя существенное влияние оказывают процессы теплоотдачи с поверхностями охлаждения. Так как НЭ имеет относительно небольшую толщину, теплопередача теплопроводностью внутри элемента практически отсутствует, а коэффициент теплоотдачи излучением или не учитывается при охлаждении в каналах, или учитывается совместным коэффициентом теплоотдачи. Таким образом, основным видом теплообмена НЭ и нагреваемой среды является конвективный теплообмен, а расчет тепловой мощности выполняется по формуле Ньютона - Рихмана:

$$P = k_{TO} S (\Theta - \Theta_0),$$

где  $P$  – тепловая мощность, отдаваемая конвекцией или лучеиспусканием окружающей среде;  $k_{TO}$  – коэффициент теплоотдачи, учитывающий в общем случае отдачу тепла конвекцией и лучеиспусканием;  $S$  – площадь теплоотдающей поверхности;  $\Theta_0$  – начальная температура теплоносителя;  $\Theta$  – температура теплоотдающей поверхности.

При известной мощности, выделяемой в НЭ, температура  $\Theta_{НЭ}$  определяется с использованием формулы

$$\Theta_{НЭ} = P_{эл2} / k_{mo} S. \quad (1)$$

С учетом выражения (1) температура НЭ:

$$\Theta_{НЭ} = \frac{4pB_{\Delta}^2 \tau^3 f^2 I_{НЭ} \rho_{НЭ}^{-1} \Delta_{НЭ} \left( \frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau} (\operatorname{cth} \frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau}) - 1 \right)}{k_{TO} S \frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau} (\operatorname{cth} \frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau})}.$$

Для НЭ площадь теплоотдающей поверхности  $S$ :

$$S = 2 \cdot \pi \cdot (R_{НЭ} - \Delta_{НЭ}) \cdot l,$$

где  $R_{НЭ}$  – внешний радиус НЭ;  $l$  – длина поверхности НЭ.

Следует отметить, что наличие коэффициента теплоотдачи  $k_{TO}$ , зависящего от температуры, скорости среды, состояния поверхности тела, формы канала и целого ряда других параметров, существенно затрудняет использование приведенной формулы. Так как нагреваемая среда в ТЭМП приводится в движение вращающимся элементом, то создается вынужденная конвекция, при которой коэффициент теплоотдачи в значительной мере зависит от безразмерного критерия Рейнольдса. Коэффициент  $k_{TO}$  зависит не только от физических свойств рабочей жидкости, скорости, температуры неподвижного элемента, формы поверхности канала, но и теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности, коэффициента температуропроводности, динамической вязкости и теоретически находится решением краевой задачи конвективного теплообмена.

Гораздо сложнее протекают процессы в неподвижной части ТЭМП – капсулированном статоре. Это, во-первых, обусловлено конструктивным исполнением капсулированного статора, представляющим собой совокупность физически разнородных материалов, находящихся в существенно отличающихся условиях теплопередачи и характеризующихся объемными градиентами температур, а во-вторых, наличием НЭ, расположенного в непосредственной близости к пакету статора.

Решение тепловой задачи реализовано с использованием двух физических моделей пакета Comsol Multiphysics – теплопереноса с учетом конвекции и теплопроводности и гидродинамики, основанной на уравнении Навье-Стокса для несжимаемой жидкости [1, 126-134].

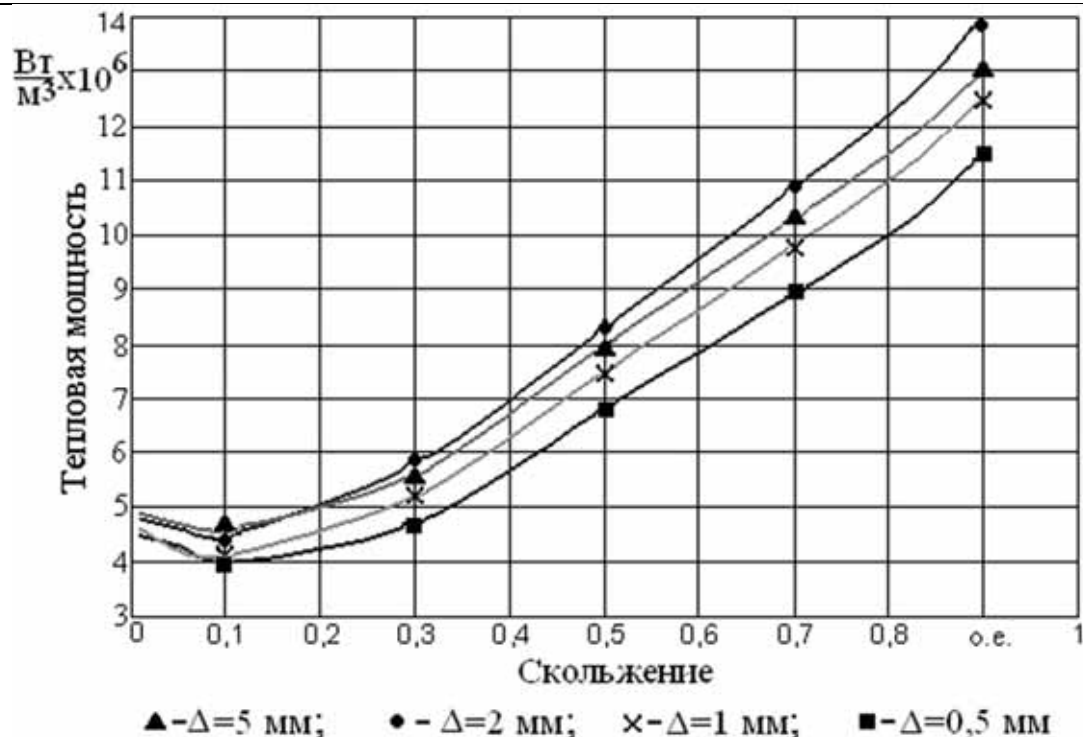


Рис. 2. Зависимость тепловой мощности ВЭ от скольжения

Расчетные зависимости мощности тепловыделения во вращающемся (см. рис. 2) и неподвижном элементах в зависимости от скольжения  $s$  (см. рис. 3) показывают, что ФЭ значительно повышают тепловую эффективность НЭ, поскольку без использования ферромагнитных элементов мощности тепловыделения в НЭ находятся в пределах от  $0,6 \cdot 10^6$  до  $1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup> в зависимости от величины скольжения, а при установке ФЭ возрастают соответственно до  $3,2 \cdot 10^7$  ...  $12 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>.

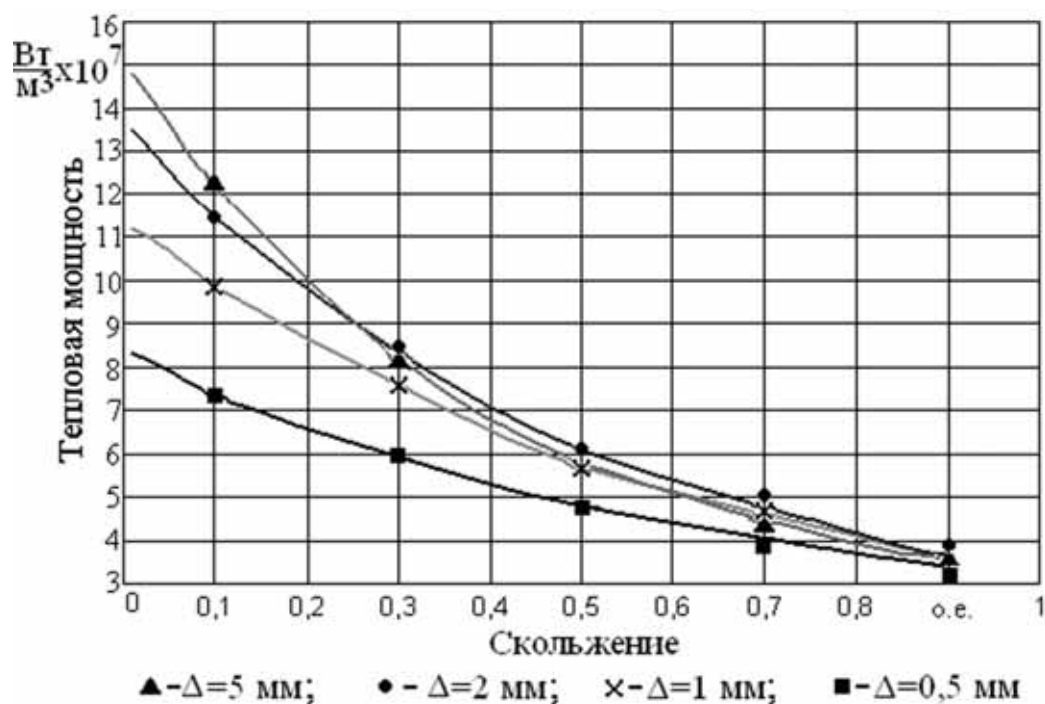


Рис. 3. Зависимость тепловой мощности НЭ от скольжения

Расчетное распределение температуры по среднему сечению в случае использования ФЭ толщиной 5 мм при скольжениях в диапазоне 0,1...0,8 позволяет определить температуры и их градиенты в рабочей области ТЭМП и капсулированном статоре.

Интегральные тепловые характеристики ТЭМП для ФЭ различной толщины (см. рис. 4) позволяют определить выходную температуру преобразователя при изменении скольжения в рассмотренном диапазоне и подтверждают возможность использования ТЭМП для нагрева и перемещения теплоносителя в автономных объектах, например, транспортного назначения, причем совместное использование ВЭ и НЭ обеспечивает достаточно стабильную результирующую температуру нагреваемой среды при номинальных напряжениях и частоте питающей сети и заданном коэффициенте теплоотдачи в диапазоне скольжений 0,3...0,8, который соответствует режиму работы преобразователя с высоким моментом сопротивления, возникающим при перемещении вязкой рабочей среды. При этом следует отметить, что полученные температурные зависимости однозначно указывают на необходимость их учета на процессы теплообмена в капсулированном статоре, предельные температуры которого ограничиваются минимальным классом нагревостойкости образующих неподвижную часть ТЭМП материалов.

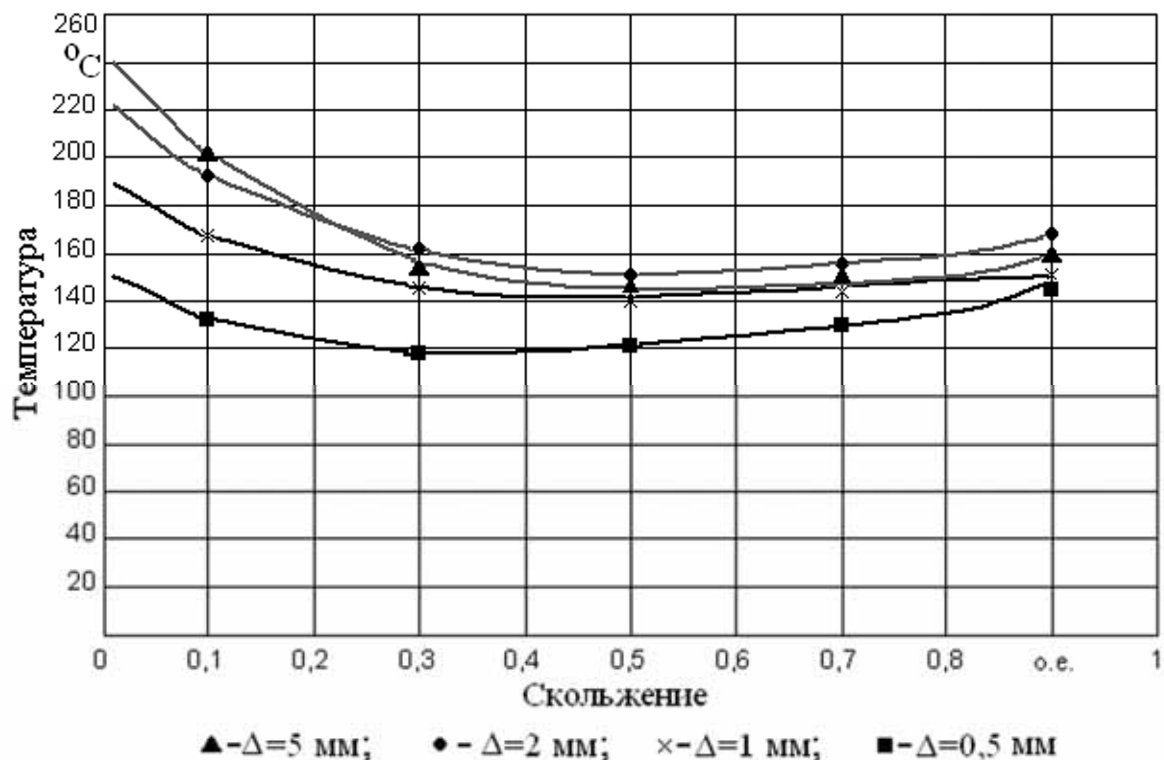


Рис. 4. Температура теплоносителя при  $k_{TO} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$

## Выводы

1. Основным энергоносителем в ТЭМП является электромагнитное поле, определяющее все энергетические соотношения, поэтому процессы преобразования энергии могут рассматриваться на основе теории классических электромеханических устройств, но с учетом конструктивных особенностей теплогенерирующих преобразователей.

**Приходченко О.В.**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ**

2. Электромагнитные процессы в ТЭМП могут быть исследованы на основе его представления как в виде вращающегося преобразователя переменного тока с двумя вторичными короткозамкнутыми обмотками: неподвижным и подвижным полыми роторами, так и трехобмоточного статического преобразователя трансформаторного типа.

3. Величина нагрузочной составляющей первичного тока определяет электромагнитную мощность, передаваемую со стороны статора и обеспечивающую два процесса преобразования теплоносителя – нагрев неподвижным элементом и нагрев и перемещение вращающимся нагревательным элементом.

4. Основным источником нагрева рабочей среды при номинальных режимах является НЭ, температура которого с учетом ряда допущений определяется аналитически.

5. Выражение для температуры НЭ позволяет находить необходимую тепловую мощность по параметрам ТЭМП, используемую для нагрева теплоносителя, и определять размерные соотношения элементов ТЭМП для достижения требуемой температуры.

6. Для предварительного анализа гидравлических процессов ТЭМП может рассматриваться в виде идеализированного источника механической мощности. При уточненных расчетах необходимо учитывать конечное число элементов и геометрические размеры ВЭ, объемные, гидравлические и механические потери.

7. Анализ электромагнитных и тепловых процессов позволяет установить зависимости выходной температуры теплоносителя от проектных параметров устройства.

8. Применение внутренних ферромагнитных элементов позволяет снизить мощность и ток статора практически до значений, характерных классическим электромеханическим преобразователям, повысить коэффициент мощности и обеспечить практическую возможность регулирования выходных параметров ТЭМП.

9. Толщина ФЭ выбирается равной минимальной ширине зубца статора, получаемой по результатам электромагнитного расчета ТЭМП; длина ФЭ составляет 0,25...0,70 от длины ВЭ, что соответствует требуемому снижению потребляемой мощности без существенного изменения условий теплоотдачи с поверхности НЭ.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: ОМ-Пресс, 2009. – 348 с.
2. Костышин, В. С. Моделирование режимов центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск: ИФГТУНГ, 2000. – 163 с.
3. Лопухина, Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е. М. Лопухина. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
4. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов [и др.]. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

**Нечитайло Т. П., Скоморовский С. А.**  
**T. P. Nechitaylo, S.A. Skomorovsky**

### УГОЛЬНЫЙ БИНАРНЫЙ ПАРОТУРБИННЫЙ ЭНЕРГОБЛОК ДЛЯ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

#### A COAL-FIRED BINARY CYCLE STEAM POWER PLANT FOR ARCTIC REGIONS



**Нечитайло Татьяна Петровна** – бакалавр техники и технологии по направлению «Теплоэнергетика», студентка магистратуры кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, оф. 211/2; 8(4217)24-11-70. E-mail: seu@knastu.ru.

**Ms. T. P. Nechitaylo** – Bachelor of Engineering Technology, specialization: heat power engineering, ME student, Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur). Mailing address: 681013, 27 Lenin St., room 211/2, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: seu@knastu.ru



**Скоморовский Станислав Альбинович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, оф. 211/2; 8(4217) 24-11-70. E-mail: seu@knastu.ru.

**Mr. Stanislav A. Skomorovsky** – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur). Mailing address: 681013, 27 Lenin St., room 211/2, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: seu@knastu.ru

**Аннотация.** Анализируется тепловая эффективность модернизации классического паротурбинного энергоблока в бинарный энергоблок с использованием низкокипящих рабочих тел.

**Summary.** The paper considers the thermal efficiency of upgrading a classical steam-turbine power generator to a binary power plant using low-boiling mediums.

**Ключевые слова:** угольный паротурбинный энергоблок, бинарный, низкокипящие рабочие тела.

**Key words:** coal-fired steam power plant, binary cycle, low-boiling mediums.

УДК 621.165

Согласно концепции стратегии развития энергомашиностроения России [4], планируется создание и ввод в эксплуатацию пылеугольных паротурбинных энергоблоков нового поколения на суперсверхкритические параметры пара (ССКП) мощностью 330, 660, 990 МВт и с ориентировочными КПД 45 – 46 %. Предлагается дополнить этот ряд энергоблоков на ССКП докритическим энергоблоком мощностью 225 МВт [4], уровнем КПД 41 % [1]. Этот энергоблок имеет тепловую экономичность на уровне лучшего российского паротурбинного блока со сверхкритическими параметрами пара (СКП) К-800-240, удельная стоимость строительства и эксплуатации которого значительно выше.

На территории самых холодных регионов северного полушария – в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах (ФО), располагается более 50 % мощностей угольных ТЭС России. Доля добычи угля в этих округах составляет более 93 % от общероссийской. Планируется создание и дальнейшее развитие новых центров угледобычи, в том числе в Кузбассе, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. При этом доля угледобычи в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке возрастет в полтора раза с 33 % до 46 – 52 % к 2030 г., что

приведет к значительному сокращению дальности перевозки угля и повышению конкурентоспособности поставок угля на внутренний и мировой рынок [3]. По предварительным оценкам в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке доля запасов угля составляет 75 % общероссийских.

Климат Северо-Восточной Сибири суровый, со среднегодовыми температурами повсеместно ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (местами до  $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), зимой минимальные температуры могут достигать  $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а длительность безморозного периода почти на всей данной территории составляет от 60 до 90 сут. В самых густонаселенных районах Западной и Средней Сибири среднегодовые температуры около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на юге Забайкалья (Восточная Сибирь) они составляют от  $-2$  до  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Несмотря на суровые климатические условия, экономическое освоение Восточной Сибири и севера Дальнего Востока неизбежно, но для этого необходимо создавать технику, адаптированную к эксплуатации при низких температурах воздуха.

Тепловую эффективность классических паротурбинных установок электростанций можно существенно повысить, если применять бинарные циклы с использованием низкокипящих рабочих тел (НРТ) и воздушное охлаждение окружающим воздухом. Климатические условия северных регионов России при такой модернизации паротурбинных энергоблоков можно использовать как для повышения КПД, так и для устойчивости функционирования в условиях низких температур. Возможный вариант такой бинарной энергоустановки – комбинация энергоблока с турбиной К-225-12,8-3Р и энергомодуля на низкокипящем рабочем теле.

В состав основного оборудования базового энергоблока входит котельная установка с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) и турбина типа К-225-12,8-3Р производства ОАО «Ленинградский металлический завод». Основные технические характеристики турбины К-225-12,8-3Р приведены в табл. 1. Котел с ЦКС позволяет нести нагрузку от 30 до 100 % номинальной мощности, поэтому регулирование нагрузки турбины производится изменением паропроизводительности котла, что значительно увеличивает экономичность в режимах частичных нагрузок.

Таблица 1

Основные технические характеристики турбины К-225-12,8-3Р [2]

Показатель	Значение
Максимальная паропроизводительность котла, т/ч	611,4
Номинальная мощность турбины, МВт	225
Давление свежего пара, МПа	12,75
Температура свежего пара / промперегрева, $^{\circ}\text{C}$	561/564
Температура охлаждающей воды, $^{\circ}\text{C}$	12

Бинарный энергоблок получен путем модернизации турбины К-225-12,8-3Р (удалены ступени последнего восьмого отсека турбины и подогреватель низкого давления) и заменой ее конденсационной установки на энергомодуль с НРТ (см. рис. 1). Парогенератор НРТ энергомодуля подключается к выхлопу турбины после удаления ступеней восьмого отсека.

Расчет тепловой схемы К-225-12,8-3Р проводился в целях ориентировочного определения удельного расхода тепла турбоустановки, расходов и параметров пара в характерных точках турбины, параметров пара на выхлопе ЧНД до и после модернизации. Путем оценки современного уровня докритических энергоблоков были приняты: относительные внутренние КПД турбины:  $\eta_{\text{цвд}} = 0,861\%$ ,  $\eta_{\text{цсд}} = 0,918\%$  и  $\eta_{\text{цнд}} = 0,891\%$ ; КПД котла –  $0,92\%$ ; КПД транспорта теплоты –  $98\%$ , электромеханический КПД –  $98\%$ . Для расчета использовались приведенные в табл. 1 данные, а КПД энергоблока был принят  $41\%$ .

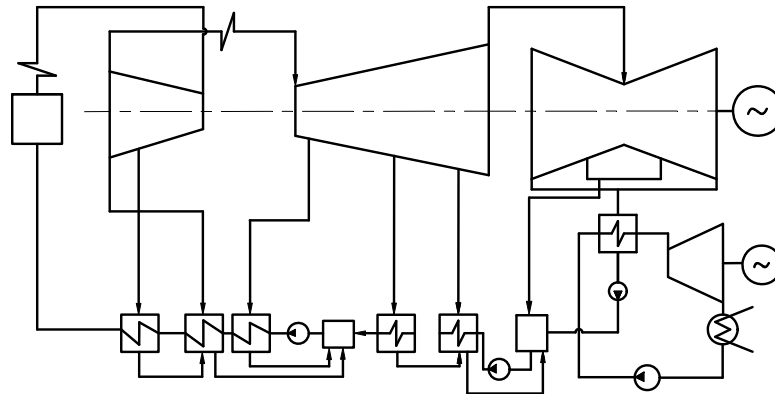


Рис. 1. Тепловая схема бинарной энергоустановки установки на базе турбоагрегата К-225-12,8-3Р

Результаты теплового расчета турбоустановки К-225-12,8-3Р следующие:

- электрическая мощность восьми отсеков до модернизации  
(на клеммах генератора)  $N_8$ , МВт .....224,8
- электрическая мощность семи отсеков после модернизации  
(на клеммах генератора)  $N_7$ , МВт .....198,5
- параметры пара на выхлопе седьмого отсека:
  - температура, °С .....65,8
  - степень сухости .....0,992

Расчеты бинарного энергомодуля проводились при следующих условиях: температура НРТ на входе в турбину -60 °С; количество тепла, отданное паром в парогенераторе НРТ, 293 МВт. При выборе НРТ температура конденсации варьировалась в диапазоне от -10 до +5 °С, что соответствует диапазону среднегодовых температур от -16 до -1 °С в регионах Сибири и севера Дальнего Востока.

На сегодняшний день насчитывается всего около 300 химических соединений, которые теоретически возможно использовать в цикле паротурбинной установки [2]. Однако на практике известен опыт применения около 15 НРТ, в том числе смесей. В ходе предварительного анализа из группы разрешенных азонобезопасных НРТ были выбраны шесть рабочих тел: аммиак, бутан, пентан, пропан, хладагенты R152a и R134a. Теплофизические свойства выбранных для исследования рабочих тел обуславливают различия в тепловых схемах бинарных энергоблоков. Исходя из этого, в расчетах были рассмотрены два варианта компоновки бинарной части цикла: с регенеративным теплообменником (в том случае, если температура рабочего тела на выхлопе турбины более чем на 10 °С превышала температуру конденсации) и с его отключением (регенеративный теплообменник на тепловой схеме бинарной энергоустановки (см. рис. 1) не показан). Наличие регенеративного теплообменника необходимо в схемах, работающих на пентане и бутане при температурах конденсации ниже +5 °С. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

С позиции термодинамической эффективности, энергомодуль на аммиаке обладает наибольшим КПД, поэтому аммиак и был выбран рабочим телом для дальнейшего исследования.

Из-за колебаний температур окружающего воздуха потребуется работа на скользких параметрах в конденсаторе и, соответственно, эффективность установки будет изменяться. Исходя из данных по среднемесячным температурам в течение года в г. Нерюнгри (южная Якутия, среднегодовая температура -7,1 °С), были проведены расчеты, которые показали, что даже в самые жаркие месяцы работоспособность бинарного энергоблока не нарушается, а его среднегодовой КПД на 4,56 % превышает КПД исходной турбины К-225-12,8-3Р (см. рис. 3).

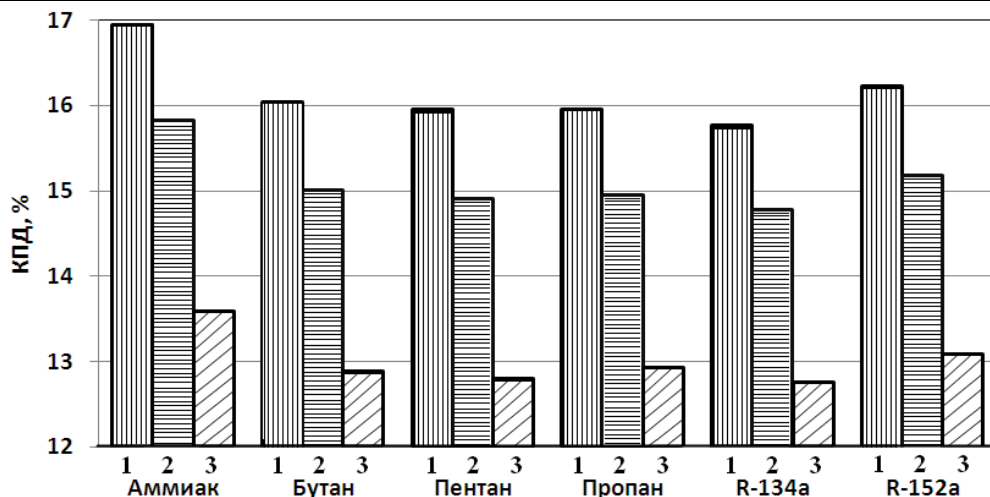


Рис. 2. КПД энергомодуля при работе на различных НРТ:

1 –  $t_k = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_k = -5\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_k = +5\text{ }^\circ\text{C}$

Среднемесячная номинальная мощность в зависимости от температуры воздуха изменяется в диапазоне от 230 до 256 МВт. При этом среднегодовая номинальная мощность составляет 249 МВт (приrost составляет более 10 % или 24 МВт).

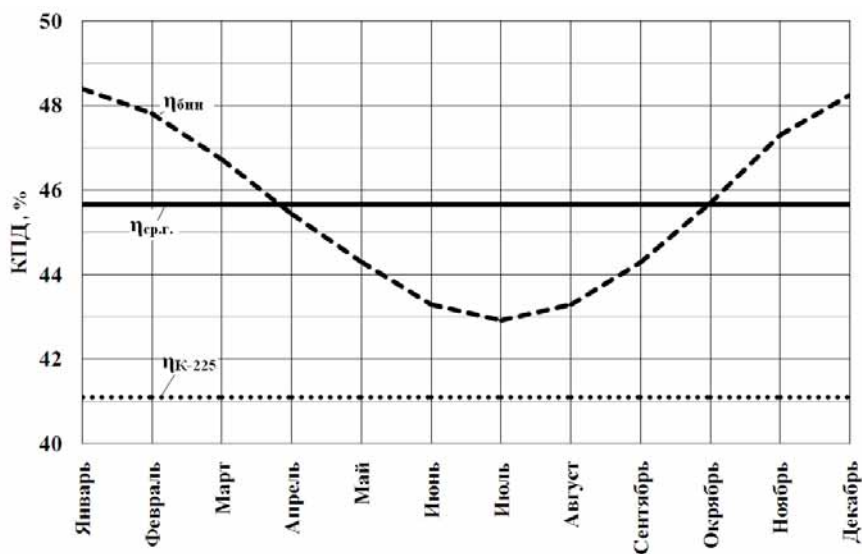


Рис. 3. Зависимости КПД энергоблока от среднемесячной температуры окружающего воздуха:  $\eta_{\text{бин}}$  – КПД бинарного энергоблока;  $\eta_{\text{ср.г}}$  – среднегодовой КПД бинарного энергоблока;  $\eta_{\text{к-225}}$  – КПД базового энергоблока с турбиной К-225-12,8-3Р

Эффективность работы бинарного энергоблока в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха приведена на рис. 4. При изменении среднегодовой температуры от  $-2$  до  $-16\text{ }^\circ\text{C}$  приrost среднегодового КПД бинарного энергоблока по сравнению с базовым К-225-12,8-3Р лежит в диапазоне от 3,7 до 5,2 %. При строительстве таких бинарных энергоблоков в Восточной Сибири и на севере Дальнего Востока их среднегодовой КПД будет находиться в диапазоне от 44,8 до 46,3 %, что сопоставимо с КПД паротурбинных энергоблоков нового поколения на ССКП.

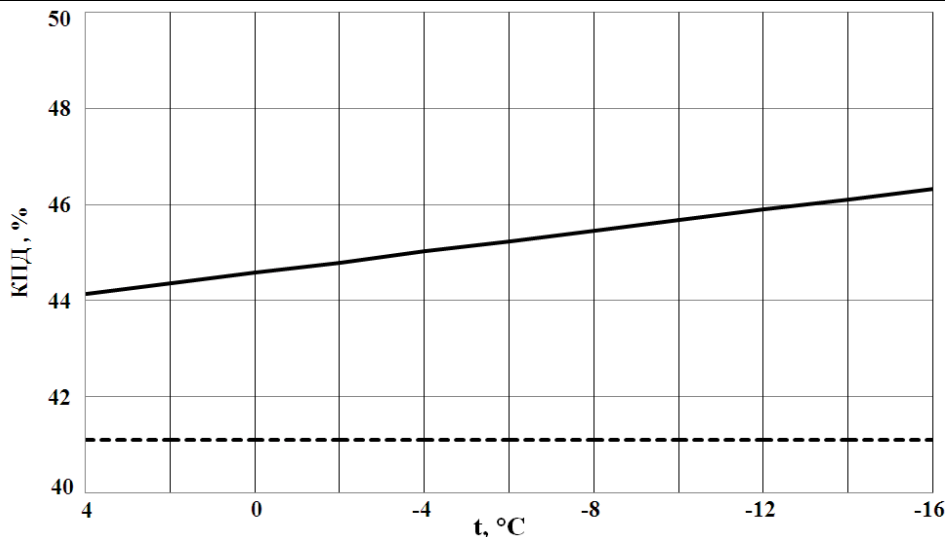


Рис. 4. Зависимость эффективности работы бинарного энергоблока в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха

Несмотря на высокую эффективность энергоустановок на аммиачном рабочем теле, одним из главных их недостатков является опасность для человека в аварийной ситуации. Однако существующие технические решения позволяют сделать работу бинарного энергоблока достаточно безопасной, что подтверждается мировой практикой эксплуатации промышленных аммиачных холодильных установок большой мощности.

В перспективе при строительстве мощных угольных ТЭС в северных регионах Сибири и Дальнего Востока возможна модернизация паротурбинных энергоблоков нового поколения на ССКП в бинарные энергоблоки. В данном случае возможно достижение КПД энергоблоков порядка 50 % без повышения температуры пара выше 600...620 °С.

Использование низких температур для существенного повышения топливной экономичности тепловых электростанций в условиях крайнего Севера может позволить снизить неблагоприятное воздействие сурового климата на конкурентоспособность промышленности северных регионов России.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков, В. П. Строительство двух энергоблоков по 225 МВт с установкой котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем на Черепетской ГРЭС. Первый Тульский экономический форум «Стратегия прорыва: инновации плюс потенциал традиций» (Тула, 28-30 ноября 2006 г.) [Электронный ресурс] / В. П. Большаков. – Режим доступа: <http://www.tula-forum.ru/2006/program2006/presentation/bolshakov.ppt>.
2. Васильев, В. А. Универсальный энергомодуль на смесевом рабочем теле [Электронный ресурс] / В. А. Васильев, И. Г. Геворков, А. В. Крайнов. – СПб.: АЦИА, 1995. – Режим доступа: <http://www.eninnet.ru/lge/lgeru.htm>.
3. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. Проект [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rosugol.ru/upload/pdf/project\\_1.pdf](http://www.rosugol.ru/upload/pdf/project_1.pdf).
4. Стратегия развития энергомашиностроения Российской Федерации на 2010-2020 гг. и на перспективу до 2030 г.: приказ Минпромторга России № 206 от 22 февраля 2011 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/15>.

**Николаенко А. С.**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА  
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ

**Николаенко А. С.**

**A. S. Nikolaenko**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА  
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ**

**MATHEMATICAL MODEL OF SOLID OXIDE FUEL CELLS' OPERATION IN A STEADY  
STATE**



**Николаенко Анна Сергеевна** – бакалавр техники и технологии по направлению «Теплоэнергетика», студент магистратуры кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681008, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Розы Люксембург, д. 26, кв. 15; 89242278240. E-mail: anka\_nikolaenko@mail.ru.

**Ms. Anna S. Nikolaenko** - Bachelor of Engineering Technology, specialization: heat power engineering, ME student at the Department of Heat&power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). 681008, Komsomolsk-on-Amur, 26, Rose Luxembourg St., flat 15; 89242278240. E-mail – anka\_nikolaenko@mail.ru.

**Аннотация.** Показана необходимость дальнейшего совершенствования тепловых электрических станций на примере гибридной энергоустановки (ГибЭУ), состоящей из топливных элементов с твердым оксидным электролитом (ТОТЭ) и газовой турбины. Впервые разработана математическая модель работы ТОТЭ на стационарных режимах работы. На базе математической модели выявлена зависимость мощности топливного элемента от параметров его эксплуатации и намечен путь дальнейших исследований.

**Summary.** The paper considers the necessity of further improvement of thermal power plants, as exemplified by a hybrid power plant consisting of Solid Oxide Electrolyte Cells (SOEC) and by a gas turbine. The first mathematical model of the performance of a SOFC in steady state is offered. Based on the model, the dependence of the capacity of a fuel cell on the parameters of its operation is shown and the plan of further investigations is suggested.

**Ключевые слова:** гибридная энергоустановка, твердооксидные топливные элементы, анод, катод, электролит, математическая модель.

**Key words:** hybrid power plant, solid oxide fuel cell, anode, cathode, electrolyte, mathematical model.

УДК 621.352

В настоящее время большое внимание уделяется разработке ГибЭУ на базе высокотемпературных топливных элементов (ТЭ) и газовой (или паровой) турбины или парогазовой установки для совместного производства электроэнергии [1; 3; 4]. Отличительной особенностью таких энергоустановок является использование принципа прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, минуя традиционные стадии преобразования энергии (химическая – тепловая – механическая – электрическая). Благодаря этому экономичность ГибЭУ почти вдвое выше, чем у традиционных, и КПД может достигать от 70 до 85 % с учетом утилизации тепла. Из-за отсутствия непосредственного химического контакта топлива с окислителем в ТЭ количество удельных выбросов вредных компонентов при работе ГибЭУ почти на 1,5 – 2,5 порядка ниже выбросов от традиционных энергоустановок [1; 3].

Простейший ТЭ представляет собой электрохимический элемент, состоящий из двух не расходуемых электродов, разделенных электролитом. В процессе работы к одному электроду (аноду) непрерывно подводят топливо, к другому (катоде) – окислитель, а на выходе получают электричество и высокопотенциальное тепло [4].

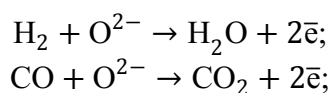


Из всех существующих на сегодняшний день типов ТЭ для стационарной энергетики наиболее предпочтительны твердооксидные (ТОТЭ), так как в состав их электродов не входят катализаторы на основе благородных металлов, что делает их нечувствительными к наличию оксида углерода в топливном газе. Рабочая температура ТОТЭ составляет около 1000 °С. При такой высокой температуре процессы на электродах протекают с большой скоростью при невысоких поляризациях.

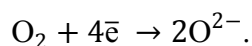
На аноде ТОТЭ топливо ( $H_2$  и  $CO$ ) окисляется, что сопровождается выделением свободных электронов, поступающих во внешнюю электрическую цепь, а одновременно образующиеся положительные ионы удерживаются на границе анод – электролит ( $H^+$ ,  $CO^+$ ). На другом конце электрической цепи электроны подходят к катоду, на котором идет реакция восстановления (присоединения электронов окислителем до  $O^{2-}$ ). Отрицательно заряженные ионы кислорода перемещаются через электролит к аноду, где взаимодействуют с положительными ионами топлива.

Токообразующие реакции могут быть представлены уравнениями:

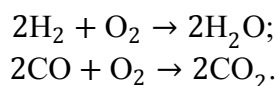
- на аноде



- на катоде



Суммарная реакция, протекающая на единичном ТОТЭ, выглядит как взаимодействие топлива с окислителем:



Электролитом в ТОТЭ обычно является керамика на основе диоксида циркония, например  $(ZrO_2)_{0.92}(Y_2O_3)_{0.08}$ , анодами – кермет никеля с диоксидом циркония, катодами – полупроводники, например  $Sr_xLa_{(1-x)}MnO_3$ ,  $Sr_xLa_{(1-x)}CoO_3$ .

Топливом в ТЭ могут являться водород, различные углеводороды и оксид углерода. Окислитель – кислород, в том числе кислород воздуха.

В данной работе рассмотрена ГибЭУ на основе ТОТЭ, высокопотенциальное тепло которых используется в газотурбинной установке (ГТУ). На рис. 1 представлена схема физических процессов гибридной энергоустановки. Воздух из атмосферы засасывается компрессором 1, где сжимается до необходимого давления и подается в рекуператор 2, куда одновременно направляются уходящие газы из газовой турбины 9. После нагрева в рекуператоре сжатый воздух направляется в батарею ТЭ со стороны катода 5. Топливо (метан) после подогрева в теплообменнике 10 горячими продуктами, поступающими из газовой турбины, подается на конверсию в реформер 3, куда одновременно поступает водяной пар из системы 11. В реформере исходное топливо взаимодействует с водяным паром, на каждый моль метана при конверсии образуется 4 моль топлива ( $H_2$  и  $CO$ ). Продукты конверсии метана подаются на анод 4 ТЭ, где происходит электрохимическая реакция, в результате которой химическая энергия топлива преобразуется в электроэнергию. Выработавшийся в ТЭ постоянный ток преобразуется в переменный посредством инвертора 7. После инвертора электрическая энергия подается в электрическую сеть. Отработавший поток анодных газов, состоящий в основном из диоксида углерода и водяного пара, смешивается с катодным воздухом в камере сгорания 8 и дожигается. Продукты горения после камеры сгорания направляются в газовую турбину, расширяясь, их потенциальная энергия преобразуется в механическую работу, которая частично расходуется на привод компрессора 1, а оставшаяся часть направляется в электрогенератор 12, где преобразуется в электрическую энергию. После турбины уходящие газы проходят через теплообменники, где охлаждаются, отдавая свое тепло сначала воздуху, а затем топливу и воде. После охлаждения газы направляются в дымовую трубу [6].

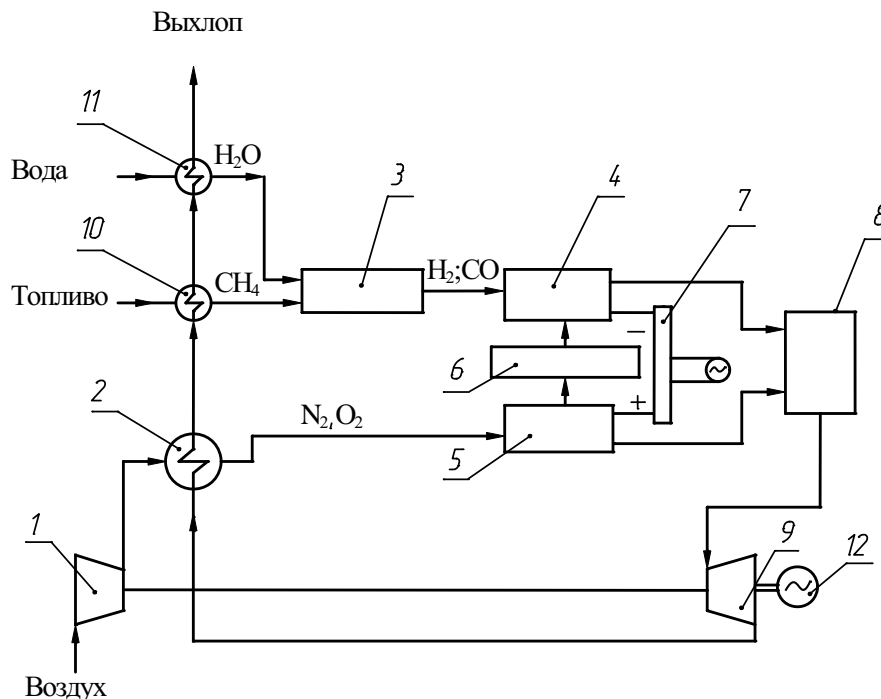


Рис. 1. Схема физических процессов гибридной энергоустановки: 1 – компрессор; 2 – рекуператор; 3 – реформер; 4 – анод; 5 – катод; 6 – электролит; 7 – инвертор; 8 – камера сгорания; 9 – газовая турбина; 10 – подогреватель; 11 – система нагрева, испарения воды и перегрева пара; 12 – электрогенератор

Проектируя систему управления технологическим процессом, разработчик должен быть уверен, что в любой ситуации система будет действовать эффективно. Поэтому при проектировании и наладке система управления должна быть подвергнута всестороннему исследованию в различных режимах.

Самый достоверный способ проверки работоспособности системы управления – натурные испытания на действующем оборудовании. Однако данный способ дорог, трудоемок и не позволяет исследовать аварийные режимы работы установки. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований на моделях реальных объектов и систем управления [5].

Для отображения явлений в сложных системах применяют математические модели. Тепловую схему ГибЭУ изображают в форме графа (см. рис. 2). Математическая модель объекта исследования представляет систему балансовых уравнений, реализующих граф системы в математической форме.

Анализ полученных балансовых уравнений показывает, что математическая модель ТОГЭ представляет ниже приведенную систему уравнений:

1 уравнение теплового баланса реформера

$$0,47G_{IX}^{CH_4} C_p t_{IX} + 0,53G_X^{H_2O} C_p t_X = (0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI};$$

2 уравнение теплового баланса анода

$$(0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI} + 1,6G_{XVII}^{O^{2-}} C_p t_{XVII} = N_{XVIII} + \\ + (1,35G_{XII}^{H_2O} C_p + 0,03G_{XII}^{H_2} C_p + 0,12G_{XII}^{CO} C_p + 1,1G_{XII}^{CO_2} C_p) t_{XII};$$

3 уравнение теплового баланса катода

$$(4,79G_{IV}^{O_2} C_p + 18G_{IV}^{N_2} C_p) t_{XII} = (1,6G_{XXI}^{O^{2-}} C_p + 18G_{XIII}^{N_2} C_p + 3,19G_{XIII}^{O_2} C_p) t_{XIII};$$

4 уравнение материального баланса электролита

$$2 \cdot 32G_{XXI}^{O^{2-}} = 2 \cdot 32G_{XVII}^{O^{2-}};$$

5 уравнение теплового баланса камеры сгорания

$$(18G_{XIII}^{N_2} C_p + 3,19G_{XIII}^{O_2} C_p) t_{XIII} + (1,35G_{XII}^{H_2O} C_p + 0,03G_{XII}^{H_2} C_p + 0,12G_{XII}^{CO} C_p + 1,1G_{XII}^{CO_2} C_p) t_{XII} + geQ_H N_{XX} = (1,62G_{XIV}^{H_2O} C_p + 1,29G_{XIV}^{CO_2} C_p + 18G_{XIV}^{N_2} C_p + 2,88G_{XIV}^{O_2} C_p) t_{XIV},$$

где  $C_p$  – изобарная теплоемкость, кДж/(кг · °C);  $t_i$  – температура  $i$ -го компонента, °C;  $G_i$  – расход  $i$ -го компонента, кг/с;  $N_{XVIII}$  – мощность ТЭ, кВт;  $geQ_H N_{XX}$  – теплота горения, кДж/с.

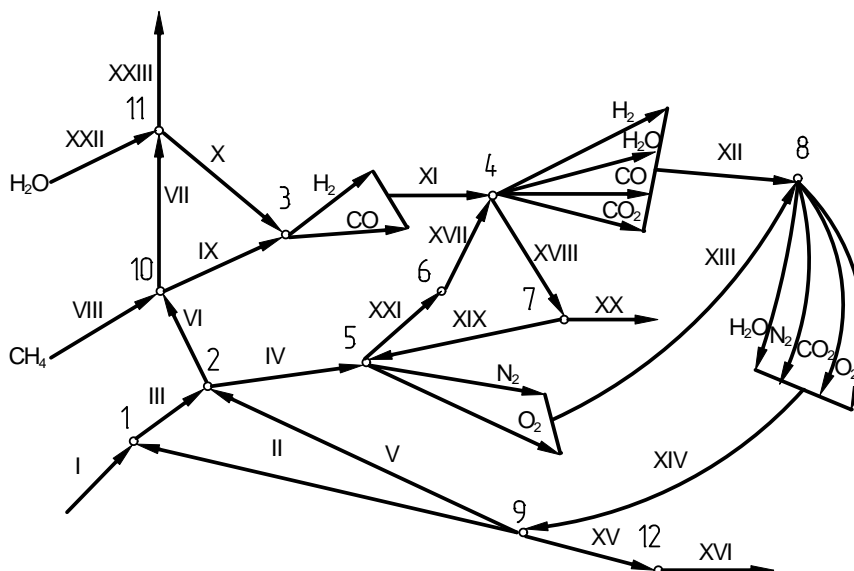


Рис. 2. Граф тепловой схемы гибридной энергоустановки:

узлы: 1 – компрессор; 2 – рекуператор; 3 – реформер; 4 – анод; 5 – катод; 6 – электролит; 7 – инвертор; 8 – камера сгорания; 9 – газовая турбина; 10 – подогреватель; 11 – система нагрева, испарения воды и перегрева пара; 12 – электрогенератор;  
связи: I, III, IV – воздух; II, XV – механическая энергия; V, VI, VII, XIV, XXIII – тепло (выхлопные газы); VIII, IX, XI – топливо; X – пар; XII – выхлоп с анода; XIII – выхлоп с катода; XVI, XVIII, XIX, XX – электрическая энергия; XXI, XVII – отрицательно заряженные ионы кислорода; XXII – вода

Одна из существенных задач разработки математической модели состоит в определении параметра оптимизации объекта исследования и такого поддержания других параметров в процессе эксплуатации, чтобы оптимальный параметр был либо максимальным, либо минимальным.

Основная цель современного энергомашиностроения состоит в достижении наибольшего энергосбережения проектируемых установок. Повышение КПД установок является существенным способом достижения этой цели. Как следствие, выбор параметра оптимизации исследуемого объекта должен отвечать данному направлению энергосбережения. В разработанную математическую модель входит 27 параметров, влияющих на работу ТЭ. Детальное

**Николаенко А. С.**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА  
НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТ**

рассмотрение каждого из этих параметров приводит к выводу, что целесообразно в качестве параметра оптимизации принять максимальную мощность ТЭ.

Для решения этой задачи необходимо выразить мощность ТЭ через все расчетные параметры:

$$N_{XVIII} = (0,82G_{XI}^{CO} C_p + 0,18G_{XI}^{H_2} C_p) t_{XI} + 1,6G_{XVII}^{O^{2-}} C_p t_{XVII} - (1,35G_{XII}^{H_2O} C_p + 0,03G_{XII}^{H_2} C_p + 0,12G_{XII}^{CO} C_p + 1,1G_{XII}^{CO_2} C_p) t_{XII}. \quad (1)$$

На основе приведенной формулы математическую зависимость мощности ТЭ от параметров математической модели можно представить в функциональной форме:

$$N_{XVIII} = f(G_{XI}^{CO}, G_{XI}^{H_2}, G_{XVII}^{O^{2-}}, G_{XII}^{H_2O}, G_{XII}^{H_2}, G_{XII}^{CO}, G_{XII}^{CO_2}, t_{XI}, t_{XII}, t_{XVII}).$$

В настоящее время во всех развитых странах проводятся исследования в области ТЭ. Ряд работ [4; 6] показывает, что электрическая мощность ТЭ можно выразить:

$$N_{TЭ} = \frac{G_{H_2} \eta_f n_e F}{1000 M_{H_2}} U_{TЭ}.$$

Применительно к нашей математической модели эта зависимость будет иметь вид:

$$N_{TЭ} = \frac{(0,82G_{XI}^{CO} + 0,18G_{XI}^{H_2}) \eta_f n_e F}{1000 (M_{CO} 0,82 + M_{H_2} 0,18)} U_{TЭ}, \quad (2)$$

где  $G_{XI}^{H_2}$  – расход водорода, кг/с;  $G_{XI}^{CO}$  – расход оксида углерода, кг/с;  $n_e$  – число электронов, участвующих в реакции;  $F$  – постоянная Фарадея, Кл/моль;  $\eta_f$  – коэффициент использования топлива в ТЭ;  $U_{TЭ}$  – напряжение ТЭ, В;  $M_{CO}$ ,  $M_{H_2}$  – молярная масса CO и H<sub>2</sub>, г/моль.

Сопоставление формул (1) и (2) приводит к следующей функциональной зависимости мощности ТЭ от его параметров:

$$N_{TЭ} = f(U_{TЭ}, G_{CO}, G_{H_2}, G_{O^{2-}}, G_{H_2O}, G_{CO_2}, \eta_f, t_{ex}^{pear}, t_{вых}^{газ}, M_{H_2}, M_{CO}, F).$$

Дальнейшее исследование данной зависимости должно позволить разработать инженерную методику расчета оптимальных параметров ГибЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коровин, Н. В. Электрохимическая энергетика / Н. В. Коровин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
2. Коровин, Н. В. Расчет коэффициента полезного действия гибридной электростанции с высокотемпературным топливным элементом / Н. В. Коровин, А. С. Седлов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 49-53.
3. Лидоренко, Н. С. Электрохимические генераторы / Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 448 с.
4. Лыкова, С. А. Высокоэффективные гибридные энергоустановки на основе топливных элементов / С. А. Лыкова // Теплоэнергетика. – 2002. – № 1. – С. 50-55.
5. Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
6. A High Efficiency PSOFC / ATS – Gas Turbine Power System. Final report. Siemens Westinghouse.

**Андрианов И. К., Олейников А. И.**  
**I.K. Andrianov, A.I. Oleinikov**

**ПОВЕРХНОСТЬ И ЗАКОН ТЕКУЧЕСТИ ДЛЯ ЖЕСТКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ С РАЗНЫМИ СВОЙСТВАМИ  
НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ**

**THE SURFACE AND THE FLOW RULE FOR THE RIGID-PLASTIC FRAME-TYPE  
SYSTEMS WITH DIFFERENT PARAMETERS OF PULL AND COMPRESSION**



**Олейников Александр Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.  
**Mr. Alexander I. Oleinikov** – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.



**Андрианов Иван Константинович** – бакалавр по направлению «Прикладная механика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.  
**Ivan K. Andrianov** – Bachelor of "Applied Mechanics" Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Аннотация.** Получены кусочно-линейное и гладкое условия текучести, закон течения для стержневой системы из жестко-пластических материалов с различными пределами текучести на сжатие и растяжение. Предложена аппроксимация сингулярной поверхности текучести, проанализированы соотношения между скоростями пластических деформаций для этих поверхностей и выполнена оценка влияния различия пределов текучести.

**Summary.** Conditions for piecewise linear yield and smooth yield are considered, a flow rule for a frame structure made of rigid-plastic materials with various yield values for pull and stress is offered. Approximation of singular yield surface is proposed, and parities between speeds of plastic deformations for these surfaces are analyzed; assessment of the impact of differences between yield points is carried out.

**Ключевые слова:** пластичность, стержневая система, разносопротивляемость, закон течения, поверхность текучести.

**Key words:** plasticity, frame structure, multimodulus behavior, flow rule, yield surface.

УДК 539.376

Рассмотрим текучесть системы из трех жесткопластических стержней, нагруженной двумя силами  $Q_1$  и  $Q_2$  (см. рис. 1, 2). Вектор с компонентами  $q_i$  представляет собою вектор скорости точки  $A$ . Пластическое течение этой системы возникает в случаях, когда эта система становится механизмом. Для того чтобы система превратилась в механизм, необходимо, чтобы два стержня перешли в пластическое состояние. Третий стержень останется жестким и будет вращаться около точки закрепления.

Многие современные и природные материалы с разного рода микронарушениями сплошности и устойчивости обладают существенно разными свойствами на растяжение и сжатие [1], поэтому далее учитываем, что стержни обладают разными пределами текучести на растяжение и сжатие

$$\sigma_m = \begin{cases} \sigma_m, \dot{\epsilon} > 0 - \text{растяжение} \\ a\sigma_m, \dot{\epsilon} < 0 - \text{сжатие, } a > 0 \end{cases},$$

где положительное число  $a$  учитывает различия пределов текучести при растяжении и сжатии.

Аналогично задаче, рассмотренной Ю. М. Работновым [2] для обычного жестко-пластического материала, получим уравнения равновесия для разносопротивляющейся стержневой системы и закон текучести.

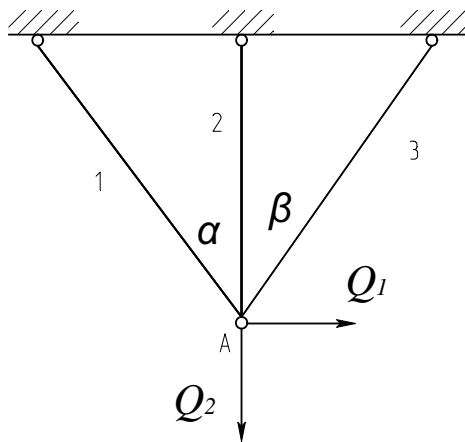


Рис. 1. Стержневая система

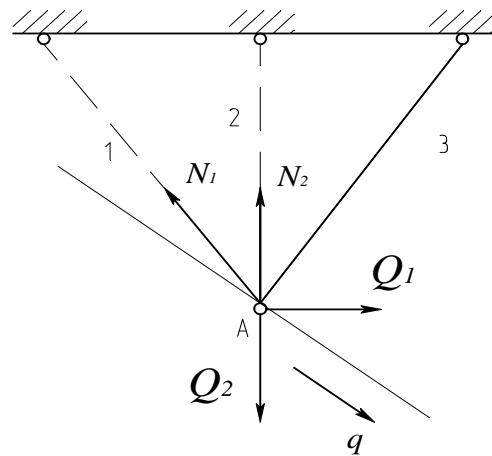


Рис. 2. Текучесть стержневой системы

Пусть стержни 1 и 2 находятся в состоянии текучести, а стержень 3 остается жестким. При вращении стержня 3 против часовой стрелки, стержни 1 и 2 будут оба растягиваться. Усилия в них одинаковы:  $N_{m1} = N_{m2} = \sigma_m F$ . Спроектируем все силы на направление, перпендикулярное к стержню 3, и получим уравнение равновесия для данной стержневой системы

$$f_1 = Q_1 \cos \beta + Q_2 \sin \beta - \sigma_m F (\sin \beta + \sin(\alpha + \beta)) = 0. \quad (1)$$

Распределение скоростей при данном вращении определено с точностью до некоторого множителя  $\lambda > 0$

$$\dot{q}_1 = \lambda \cos \beta, \quad \dot{q}_2 = \lambda \sin \beta. \quad (2)$$

Уравнение (1), по сути, является условием текучести, а соотношения (2) – ассоциированным законом течения. Действительно, применив ассоциированный закон к условию текучести  $f_1$ , получим

$$\dot{q}_i = \lambda \frac{\partial f_1}{\partial Q_i};$$

$$\dot{q}_1 = \lambda \frac{\partial f_1}{\partial Q_1} = \lambda \cos \beta, \quad \dot{q}_2 = \lambda \frac{\partial f_1}{\partial Q_2} = \lambda \sin \beta.$$

Аналогично рассматривая другие возможные движения точки  $A$  данного механизма в соответствии с возможными попарными комбинациями перешедших в пластическое состояние стержней, получим шесть кусочно-линейных условий текучести

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = Q_1 \cos \beta + Q_2 \sin \beta - \sigma_m F (\sin \beta + \sin(\alpha + \beta)); \\ f_2 = -Q_1 \cos \beta - Q_2 \sin \beta - a \sigma_m F (\sin \beta + \sin(\alpha + \beta)); \\ f_3 = Q_1 - \sigma_m F (\sin \alpha + a \sin \beta); \\ f_4 = -Q_1 - \sigma_m F (a \sin \alpha + \sin \beta); \\ f_5 = Q_1 \cos \alpha - Q_2 \sin \alpha - a \sigma_m F (\sin \alpha + \sin(\alpha + \beta)); \\ f_6 = -Q_1 \cos \alpha + Q_2 \sin \alpha - \sigma_m F (\sin \alpha + \sin(\alpha + \beta)). \end{array} \right.$$

Кусочно-линейные условия текучести образуют в пространстве сил шестиугольник текучести (см. рис. 3).

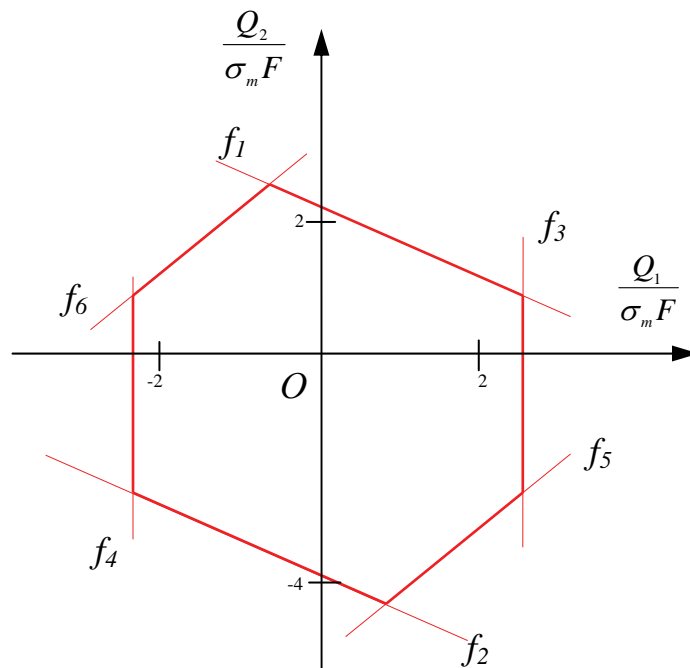


Рис. 3. Поверхность текучести для трехстержневой системы при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ ,  $a = 2$

В случае, когда  $\alpha = \beta$ , кусочно-линейные условия текучести могут быть аппроксимированы гладким условием, представляющим собой описанный эллипс вокруг поверхности текучести, уравнение которого можно записать в следующем виде:

$$\left[ \frac{2Q_2 + \sigma_m F (2 \cos \alpha + 1)(a - 1)}{\sigma_m F (2 \cos \alpha + 1)(a + 1)} \right]^2 + \left[ \frac{Q_1}{\sigma_m F \sin \alpha (a + 1)} \right]^2 \frac{4(\cos^2 \alpha + \cos \alpha)}{(2 \cos \alpha + 1)^2} = 1.$$

Поверхность текучести состоит из гладких, в данном случае прямолинейных участков, но имеет угловые точки, в которых производная не существует. В точке  $A$  многоугольника текучести (см. рис. 4) нагрузка будет удовлетворять двум условиям текучести  $f_1$  и  $f_3$ , из которых следует, что все три стержня находятся в состоянии текучести, однако скорость точки  $A$  будет не вполне произвольной, она должна быть такой, чтобы стержни 1 и 2 растягивались, а стержень 3 сжимался.

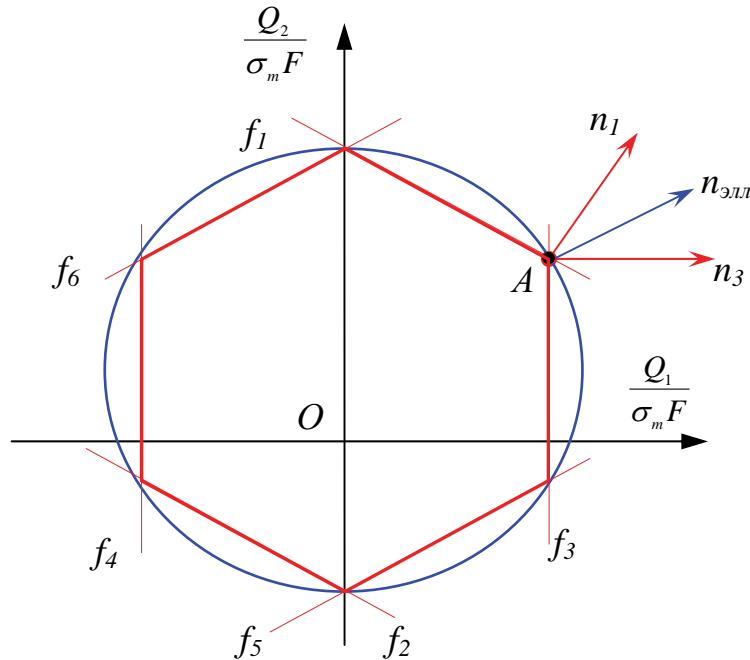


Рис. 4. Поверхность текучести и ее гладкая аппроксимация

В этом случае для определения зависимости между скоростью деформации и нагрузками будем использовать обобщенный ассоциированный закон течения

$$\dot{q}_i = \sum_{n=1}^N \lambda_n \frac{\partial f_n}{\partial Q_i};$$

$$\dot{q}_1 = \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial Q_1} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial Q_1} = \lambda_1 \cos \beta + \lambda_3, \quad \dot{q}_2 = \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial Q_2} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial Q_2} = \lambda_1 \sin \beta.$$

Такое деформирование возможно только в том случае, если вектор скорости точки  $A$  лежит внутри угла, образованного нормальными  $n_2$  и  $n_1$  к поверхности.

Аналогичный результат можно получить, если использовать аппроксимацию кусочно-линейного условия текучести эллипсом при  $\alpha = \beta$ . Убедимся в этом: определим направление вектора скорости перемещений для угловой точки  $A$  с помощью уравнения аппроксимирующей кривой.

Уравнение нормали к эллипсу  $n_{\text{элли}}$

$$\frac{Q_2}{\sigma_m F} = \cos \alpha (1 - a) + 1 - \frac{\sin^2 \alpha (1 + a)}{2(\cos^2 \alpha + \cos \alpha)} + \frac{\sin \alpha}{2(\cos^2 \alpha + \cos \alpha)} \left( \frac{Q_1}{\sigma_m F} \right).$$

Уравнение нормали  $n_1$

$$\frac{Q_2}{\sigma_m F} = \cos \alpha (1 - a) + 1 - \frac{\sin^2 \alpha (1 + a)}{\cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{Q_1}{\sigma_m F} \right).$$

Уравнение нормали  $n_3$

$$\frac{Q_2}{\sigma_m F} = \cos \alpha (1 - a) + 1.$$

Для определения направления вектора скорости, который будет параллелен вектору нормали  $n_{элл}$ , рассмотрим множители, стоящие перед  $Q_1 / \sigma_m F$ , причем они не зависят от параметра разномодульности

$$k_{элл} = \frac{\sin \alpha}{2(\cos^2 \alpha + \cos \alpha)}, k_1 = \operatorname{tg} \alpha, k_3 = 0.$$

Оценим данные коэффициенты, поскольку именно они определяют угол наклона вектора скорости. Как видно из графика (см. рис. 5), значение угла наклона  $k_{элл}$  всегда будет лежать в области между крайними положениями  $k_1$  и  $k_3$ , таким образом, условие, которое требует, чтобы вектор скорости лежал внутри угла, образованного нормальными  $n_1$  и  $n_3$ , выполняется и результаты, полученные с помощью обобщенного ассоциированного закона и с помощью уравнения аппроксимирующей кривой, будут совпадать.

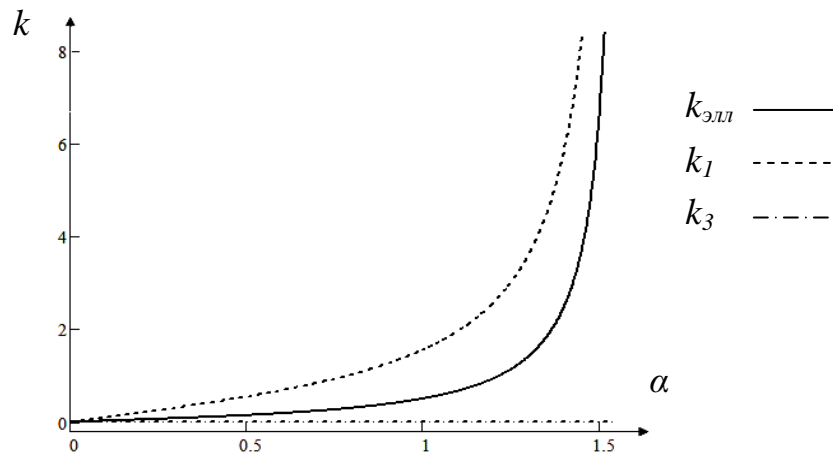


Рис. 5. Зависимость тангенса угла наклона  $k_i$  вектора скорости от угла  $\alpha$

На данном графике видно, что при стремлении  $\alpha \rightarrow \pi/2$  кривая  $k_{элл}$  будет приближаться к кривой  $k_1$ , то есть  $k_{элл} \rightarrow k_1$ . При совпадении этих кривых в бесконечности вектор скорости перемещений будет параллелен вектору нормали  $n_1$  и закон текучести будет определяться согласно условию текучести  $f_1$ .

Оценим влияние величины  $a$  на поверхность текучести. Для обычного материала, когда  $a = 1$ , кривая текучести должна быть симметричной относительно каждой из осей, так как при изменении знака напряжений на обратный также имеет место состояние текучести (см. рис. 6) и материал будет обладать одинаковыми пределами текучести на растяжение и на сжатие.

Ассиметричность возникает, когда коэффициент  $a \neq 1$ . В том случае, если  $a > 1$ , поверхность текучести будет увеличиваться в размерах вдоль оси  $Q_2 / \sigma_m F$ , тогда как будет увеличиваться и жесткая область. Такие поверхности будут определять поведение стержневых систем, предел текучести которых на сжатие больше, чем на растяжение. При  $a \rightarrow \infty$  стержни практически не оказывают сопротивления растяжению, например в случае жестко-сыпучего материала.

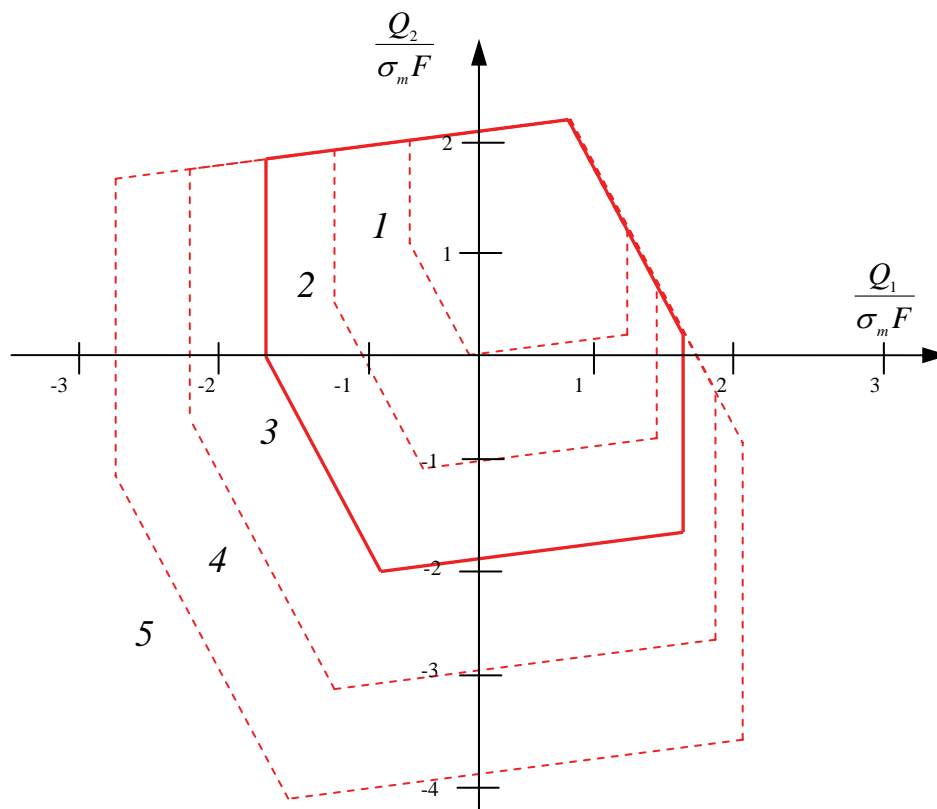


Рис. 6. Поверхности текучести для стержневой системы ( $\alpha = 70^\circ, \beta = 40^\circ$ ) при различных коэффициентах разномодульности:

- 1 – кривая текучести при  $a = 0$ ; 2 – кривая текучести при  $a = 0,5$ ;  
 3 – кривая текучести при  $a = 1$ ; 4 – кривая текучести при  $a = 1,5$ ;  
 5 – кривая текучести при  $a = 2$

При  $a < 1$  поверхности текучести будут уменьшаться вдоль оси  $Q_2/\sigma_m F$ , они будут характерны для стержневых систем, материал которых лучше сопротивляется растяжению, нежели сжатию. При  $a = 0$  поверхность текучести будет соответствовать, например, системе стержней из нитевидных и волокнистых материалов, которые не сопротивляются сжатию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мясников, В. П. Основы механики гетерогенно-сопротивляющихся сред / В. П. Мясников, А. И. Олейников. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 172 с.
2. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 713 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Космынин А. В., Красильникова О. А., Гуменюк Н. С.**  
**A.V. Kosmynin, O.A. Krasilnikova, N.S. Gumenyuk**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
УПОРНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ**

**A TEST BED FOR TESTING GAZOSTATIC THRUST BEARING PARAMETERS**

**Космынин Александр Витальевич** – доктор технических наук, профессор, декан ФЭТМТ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)142-191. E-mail: avkosm@knastu.ru.

**Mr. Alexander V. Kosmynin** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Transport and Marine Technologies of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8(4217)142-191, e-mail: avkosm@knastu.ru.

**Красильникова Ольга Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)543074. E-mail: faks@knastu.ru.

**Ms. Olga A. Krasilnikova** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Shipbuilding Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8(4217)543074, e-mail: faks@knastu.ru.

**Гуменюк Надежда Сергеевна** – старший преподаватель кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)543074. E-mail: faks@knastu.ru.

**Ms. Nadezhda S. Gumenyuk** – Senior Lecturer at the Department of Shipbuilding Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: faks@knastu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрена экспериментальная установка для исследования грузоподъемности, жесткости смазочного слоя и расхода газа упорных газостатических подшипников с лабиринтным уплотнением рабочей поверхности.

**Summary.** A test bed is considered for the study of the bearing capacity, lubricating film rigidity and gas consumption of gazostatic thrust bearings with labyrinth seal of the bearing surface.

**Ключевые слова:** упорные газостатические подшипники, лабиринтные уплотнения, грузоподъемность, жесткость смазочного слоя, расход газа.

**Key words:** gazostatic thrust bearing, labyrinth seal, bearing capacity, lubricating film rigidity, gas consumption.

УДК 621.822.572.-405.8

Современная тенденция развития высокоскоростных машин тесно связана с внедрением в их конструкцию бесконтактных опор, к которым, в частности, относятся газостатические подшипники. Имея несомненный ряд преимуществ перед известными типами опор, разные виды газовых подшипников объединяет один недостаток – сравнительно низкая несущая способность смазочного слоя, что сдерживает их более широкое применение в различных областях техники.

Одним из возможных путей повышения грузоподъемности и жесткости смазочного слоя упорных газостатических подшипников (УГСП) является уплотнение их рабочей поверхности кольцевыми лабиринтами. Некоторые экспериментальные исследования таких УГСП представлены в работах [1; 2]. Вместе с тем приходится констатировать ограниченность проведенных исследований, не позволяющих в полной мере судить об эффективности применения лабиринтных уплотнений.

Для более широкого представления об особенностях работы УГСП с прямоточными лабиринтами в КНАГТУ спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для исследования эксплуатационных характеристик упорных газостатических подшипников.

**Космынин А.В., Красильникова О.А., Гуменюк Н.С.**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**УПОРНЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ**

Установка позволяет проводить испытания УГСП в статическом и гибридном режимах работы. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 1.

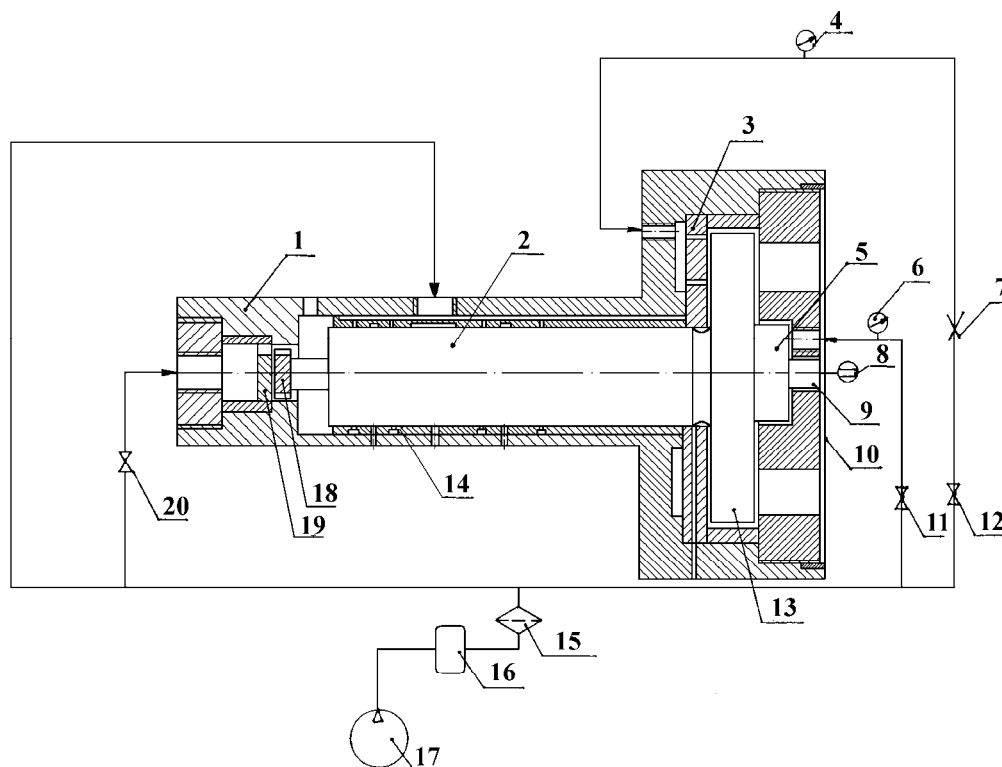


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Стенд включает в себя корпус 1, внутри которого установлен испытуемый подшипник 3, горизонтальный вал 2, выполненный совместно с пятой УГСП 13 и поршнем 5 для создания осевой нагрузки. На другом конце вала крепится турбинное колесо 18 осевого типа. Оно приводится во вращение воздухом, истекающим из соплового аппарата 19. Опорой вала служат два цилиндрических газостатических подшипника 14, которые имеют два ряда питающих отверстий. В каждом ряду расположено по 16 отверстий диаметром 0,4 мм. Зазор между пятой и подшипником определяется по осевому перемещению короткого вала 9.

Ротор представляет собой цилиндрический вал диаметром 40 мм и длиной 170 мм. Вал изготовлен из стали 45. Поверхность вала закалена до твердости HRC 50...55, после чего подвергнута хромированию и супершлифованию доведена до девятого класса шероховатости с высотой микронеровностей  $Ra = 0,32$  мкм.

Радиальные подшипники и исследуемые УГСП изготовлены из бронзы ОФ 10-1. Контроль отклонений от прямолинейности и плоскостности поверхности УГСП осуществлялся с помощью индикатора часового типа на штативе, установленном на поверочной плите и плоскомера конструкции ЭНИМС. Абсолютная максимальная погрешность отклонения от прямолинейности и плоскостности, определяемая как наибольший размах показаний измерительной головки, составляла не более 7 мкм, что добивалось притиркой поверхности УГСП алмазной пастой.

Экспериментальный стенд работает следующим образом. От компрессора 17 сжатый воздух подается в ресивер 16. Далее через устройство очистки воздуха 15 рабочая среда одновременно поступает к сопловому аппарату, нагрузочному устройству, газовым опорам вала и к испытуемому подшипнику через расходомерное устройство 7. Клапан 20 служит для изменения вращения рабочего колеса. Клапаны 11 и 12 предназначены для создания необходимого давления на нагрузочном устройстве и на УГСП соответственно. Отработанный воздух через сверления в корпусе удаляется в атмосферу.

Для проведения исследований предусмотрена развитая система замеров. Расход воздуха измеряется набором сменных диафрагм, образцового и дифференциального манометров, установленных на подводящем трубопроводе.

Для измерения частоты вращения ротора используется магнитно-индукционный метод. От намагниченного ротора синусоидальный сигнал без усилия подается на частотомер ЧЗ-35, который обеспечивает точность измерения частоты вращения до  $\pm 6 \text{ мин}^{-1}$ .

Температура воздуха перед диафрагмой определяется ртутным лабораторным термометром, заключенным в гильзу.

Осевое смещение короткого вала, по которому определяется зазор между пятой и подшипником, измеряется часовым индикатором 8 типа ИЧ 10-12М с ценой деления 1 мкм, который крепится к крышке 10. Такой способ измерения зазора применяется в случае проведения испытаний с УГСП в гибридном режиме. В статическом режиме испытаний зазор определяется как среднеарифметическое значение показаний трех индикаторов, равномерно установленных по окружности крышки.

Давление воздуха на нагрузочном устройстве и давление наддува регистрируются с помощью образцовых манометров 6 и 4 соответственно. Все измерительные приборы прошли метрологическую поверку.

Использование в экспериментальном стенде опор с дискретным наддувом потребовало уделить особое внимание системе очистки воздуха. В этом качестве хорошо зарекомендовал себя вихревой маслоотделитель (ВМО).

Принцип действия ВМО (см. рис. 2) аналогичен принципу действия вихревых сепараторов и основан на выделении аэрозолей, возникающих при вращении потока под действием центробежных сил.

Капли жидкости, взвешенные в потоке газа, поступающего через тангенциальное сопло 1, отбрасываются к стенкам корпуса 5 и вместе с частью периферийного нисходящего потока газа попадают в бункер 10. Затем эта часть газа в виде восходящего вращающегося потока возвращается из бункера через рециркуляционную трубу 7 с лопаточным завихрителем 8 и вытеснителем 6 в приосевую зону аппарата. На наружной поверхности рециркуляционной трубы установлена подпорная шайба 9, которая разделяет рабочую вихревую камеру аппарата от шламового бункера. Вытеснитель 6 в приосевой зоне занимает область течения вынужденного вихря, сепарирующее действие которого минимально. Через эту зону за счет турбулентности мелкодисперсная аэрозоль транспортируется в выходной патрубок 3. Отбойная шайба 4 предотвращает попадание в выходной патрубок пленки жидкости. Эта пленка поступает на наружную поверхность выходного патрубка 3 с цилиндрической поверхности корпуса 5 через торцевую наклонную плоскость камеры под действием градиента давления и капиллярных сил (сил поверхностного натяжения). Очищенный воздух выходит из патрубка 3 к потребителю, предварительно пройдя через раскручиватель 2.

Экспериментальная установка показала высокую надежность работы узлов и систем стенда, а также достаточную точность измерения характеристик УГСП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, А. М. Влияние конструктивных факторов на несущую способность кольцевых газостатических подпятников турбомашин / А. М. Антонов, Н. П. Седько // Труды НКИ. – Николаев. – 1972. – № 55. – С. 28-32.
2. Седько, Н. П. Некоторые результаты экспериментального исследования газостатических двухрядных подпятников с лабиринтными канавками / Н. П. Седько, Я. Х. Сорока // Труды НКИ. – Николаев. – 1971. – № 42. – С. 36-40.

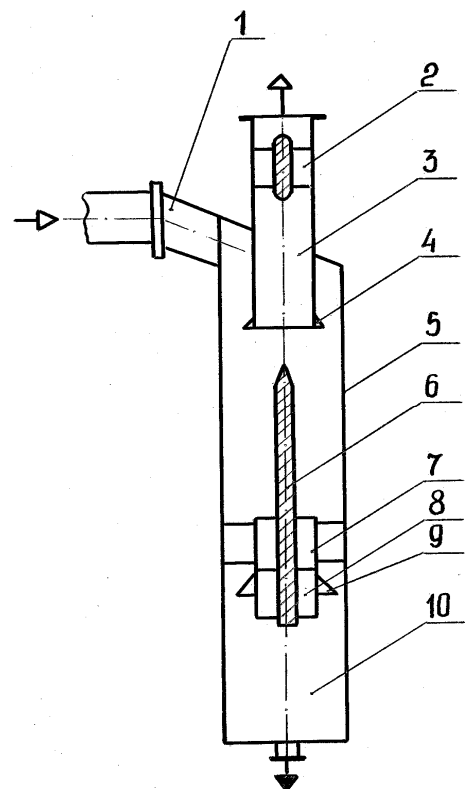


Рис. 2. Конструкция ВМО

Димитрюк О. К., Танкова С. Г.  
ПОГРЕШНОСТЬ НЕ СОВМЕЩЕНИЯ БАЗ (ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ)

Димитрюк О. К., Танкова С. Г.  
O.K.Dimitryuk, S.G.Tankova

## ПОГРЕШНОСТЬ НЕСОВМЕЩЕНИЯ БАЗ (ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ)

### ERRORS OF LOCATING



**Димитрюк Олег Калинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Первостроителей, д. 19, кв. 435.

**Mr. Oleg K. Dimitryuk** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024 Komsomolsk-on-Amur, 19, Pervostroiteley Pr., apt. 435.



**Танкова Светлана Геннадьевна** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Ms. Svetlana G. Tankova** – PhD in Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Погрешность несовмещения баз является самой коварной, влияющей на точность взаимного расположения поверхностей. В работе предложена методика выявления и определения погрешности несовмещения баз при разработке технологических процессов.

**Summary.** Errors of locating is the most deceitful inaccuracy impacting the exactness of relative positioning of surfaces. The paper suggests a method for revealing and defining such errors at production process design.

**Ключевые слова:** точность, базирование, опорная точка, установочная база.

**Keywords:** accuracy, locating, reference point, base.

УДК 621.941.06

В учебной и технической литературе использовалось понятие «**погрешность базирования**», но стандарт [2], используя это понятие, изменил смысл данного термина, и учёным-технологам пришлось вводить новое понятие – «**погрешность несовмещения баз**».

**Погрешность базирования** – отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от требуемого.

Основными факторами, определяющими погрешность базирования, являются: размеры базовых поверхностей заготовки или изделия, правильное расположение опорных базовых точек на поверхностях заготовки или изделия, неопределённость базирования заготовки, смена базовых поверхностей.

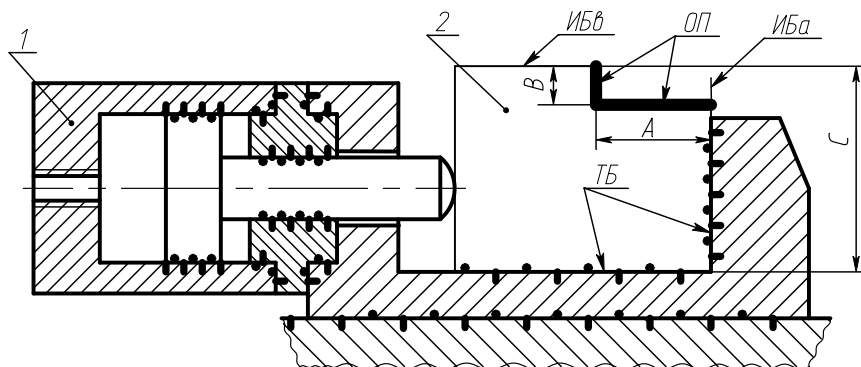
Неопределённость базирования заготовки может быть вызвана: случайностью подбора и местонахождения точек контакта заготовки с базовыми элементами приспособления или станка из-за отклонений формы контактирующих поверхностей; неполным контактом заго-

товки с базовыми элементами приспособления; деформированием заготовки при закреплении и в процессе обработки; недостаточностью силового замыкания, в сравнении с силами, действующими на заготовку в процессе её обработки.

**Погрешность несовмещения баз** – разность предельных расстояний измерительной базы относительно технологической или установленного на размер инструмента.

В результате изучения и исследования сути этих понятий заслуживает внимание задача выявления, исключения или уменьшения погрешности несовмещения баз.

Погрешность несовмещения баз равна нулю при совмещении измерительной базы выполняемого размера и одной из технологических баз. На рис. 1 показана схема установки, для которой погрешность несовмещения баз по отношению к размеру  $A$  равна нулю:  $\varepsilon_{н.δA} = 0$  (технологическая и измерительная базы совмещены в одной плоскости), а по отношению к размеру  $B$  равна допуску  $T$  на размер заготовки  $C$ :  $\varepsilon_{н.δB} = T$  (технологическая база – нижняя поверхность заготовки, не совмещена с измерительной базой – верхняя поверхность заготовки).



*ИБа – измерительная база для размера A; ИБв – измерительная база для размера B;  
ТБ – технологические базы; ОП – обрабатываемые поверхности;  
••• (точки) – основные базы; ■■■ (черточки) – вспомогательные базы;  
1 – гидроцилиндр; 2 – заготовка*

Рис. 1

При разработке схем базирования желательно исключать погрешность несовмещения баз совмещением технологических и измерительных баз. Однако при разработке технологического процесса исключить погрешность несовмещения баз во всех случаях не удаётся. Поэтому надо уметь выявлять погрешность несовмещения баз и производить перерасчёт конструкторских размеров на технологические в соответствии с избранной последовательностью обработки поверхностей.

Выявление погрешности несовмещения баз рекомендуется производить в следующей последовательности:

- 1) найти измерительную базу для выполняемого размера;
- 2) найти технологическую базу для выполняемого размера;
- 3) определить размер между технологической и измерительной базами;
- 4) определить допуск на этот размер, который и будет равен погрешности несовмещения баз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов / И. М. Колесов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1999. – 591 с.
2. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – Введ. 1977-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 35 с.

**Ли А., Туркменов Х. И., Рузиев Ш.Н.**  
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ  
СЕМЕННОГО ВОРОХА В БУНКЕРЕ КЛЕВЕРОТЕРКИ

**Ли А., Туркменов Х. И., Рузиев Ш. Н.**  
**A.Lee, H.I.Turkmenov, Sh.N.Ruziev**

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ  
СЕМЕННОГО ВОРОХА В БУНКЕРЕ КЛЕВЕРОТЕРКИ**

**ON CERTAIN ISSUES RELATED TO THE THEORY OF MOVEMENT AND DISTRIBUTION OF SEED WEIGHT IN THE CLOVER-HULLER BIN**

**Ли Афанасий** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник – исследователь (докторант), доцент кафедры «Материаловедение и технология конструкционных материалов, прикладная механика и стандартизация» Ташкентского института инженеров ирригации и мелиорации (Республика Узбекистан, Ташкент). E-mail: as\_lee@mail.ru.

**Mr.Afanasy Lee** – PhD in Engineering, Senior Researcher (Doctoral Candidate), Associate Professor, Department of Materials Technology and Construction Materials Technology, Applied Mechanics and Standardization, Tashkent Institute of Irrigation and Melioration (Uzbekistan). E-mail: as\_lee@mail.ru

**Туркменов Хасан Ишимович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология конструкционных материалов, прикладная механика и стандартизация» Ташкентского института инженеров ирригации и мелиорации (Республика Узбекистан, Ташкент). E-mail: turkmenov@yandex.ru.

**Mr. Hassan I. Turkmenov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials Technology and Construction Materials Technology, Applied Mechanics and Standardization, Tashkent Institute of Irrigation and Melioration (Uzbekistan). E-mail: turkmenov@yandex.ru

**Рузиев Шохрухбек Набиевич** – старший преподаватель кафедры «Естественно-математические науки», Туринский политехнический университет (Республика Узбекистан, Ташкент). E-mail: shohruzn@yahoo.com.

**Mr. Shohruhbeck N. Ruziev** – Senior Lecturer, Department of Natural and Mathematical Studies, Turin Polytechnic University, City of Tashkent (Uzbekistan). E-mail: shohruzn@yahoo.com

**Аннотация.** В данной статье приведены некоторые теоретические аспекты уравнения движения и распределения массы семенного вороха в бункере клеверотерки. Выведенные аналитические зависимости позволяют определить некоторые выходные параметры дозатора.

**Summary.** The paper deals with several theoretical aspects of the movement and weight distribution of the seed heap in the clover-huller bin. The resulting analytical dependencies allow us to define certain output parameters of the dispenser.

**Ключевые слова:** масса, сила, давление, бункер, линия, сечение, объем, вес, условие, равномерность, движение, площадь, уравнение.

**Key words:** weight, force, pressure, bin, line, section, volume, mass, condition, uniformity, movement, area, equation.

УДК 631.354.2

**Введение**

Свежеубранные семена имеют, как правило, высокую среднюю влажность (20-25 %) и засоренность (до 20-30 %), в них содержится много примесей – необмолоченные бобики, обломки стеблей и листьев люцерны, поврежденных и недозревших семян, а также семян сорных и карантинных растений. Особенно опасны склонность свежеубранного вороха к самосогреванию и возможность быстрой утраты семенных качеств. При поступлении биомассы на ток, во избежание самосогревания, она в первую очередь должна пройти предваритель-

ную очистку. При этом семена отделяются от необмолоченных бобиков, крупных влажных примесей, щуплых и поврежденных семян.

По исследованиям некоторых авторов [1] предварительная очистка улучшает технологические свойства семенной массы, повышает производительность и надежность работы транспортеров, сушилок, бункеров активного вентилирования. В механизмах предварительной очистки производительность процесса определяется характером движения массы в бункере.

В статье рассматриваются вопросы кинематики и динамики движения массы семенного вороха в бункере.

### Теория движения и распределения массы семенного вороха в бункере клеверотерки

Теория движения и распределения массы семенного вороха в бункере клеверотерки выполнена согласно основным положениям механики и высшей математики [3; 4; 5] с учетом технологических особенностей процесса дозирования семян люцерны.

На массу семенного вороха люцерны в усеченной пирамиде действуют силы земного притяжения и давление массы вороха на верхнем и нижнем сечениях (см. рис. 1).

Сила земного притяжения

$$G = \rho g S l \sin \alpha ; l \sin \alpha = z_1 - z_2 .$$

Давление массы вороха на верхнем и нижнем сечениях  $p_1$  и  $p_2$  бункера. При равномерном движении массы вороха в бункере распределение давления в поперечных сечениях осуществляется по законам статики, поэтому  $P_1 = p_1 S$  и  $P_2 = p_2 S$ , где  $p_1$  и  $p_2$  – статические давления в центре тяжести площадей  $S$  в произвольных точках сечений, лежащих на одной линии пересечения этих сечений.

Сумма проекций этих сил равна

$$P_1 - P_2 = S(p_1 - p_2) .$$

Проекции сил  $F$  и сил давления  $F_1$  стенок пирамиды на боковую поверхность выделенной массы вороха равны нулю, так как они перпендикулярны выбранной оси проекции.

Активная сила равна сумме всех действующих сил

$$\sum F_{\text{акт}} = \rho g S (z_1 - z_2) + S(p_1 - p_2) .$$

Составляющие силы сопротивления

$$F = \int_0^{\chi} \tau_0 l^* d\chi = \tau_0 l^* \chi ; l^* = \pi(r + l) ,$$

где  $\tau_0$  – среднее значение касательного напряжения на стенке;  $l$  – высота лопасти.

Приравнявая эти силы и с учетом условий равномерности сил, получаем выражение

$$\rho \omega g (z_1 - z_2) + S(p_1 - p_2) = \tau_0 l \chi ,$$

где  $S = ab$  – площадь поперечного сечения бункера ( $a$  и  $b$  – соответственно ширина и длина стенки);  $\chi = 2(a + b)$  – периметр поперечного сечения бункера.

Объем усеченной пирамиды можно определить по формуле

$$V = \frac{h}{3} (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2}) .$$

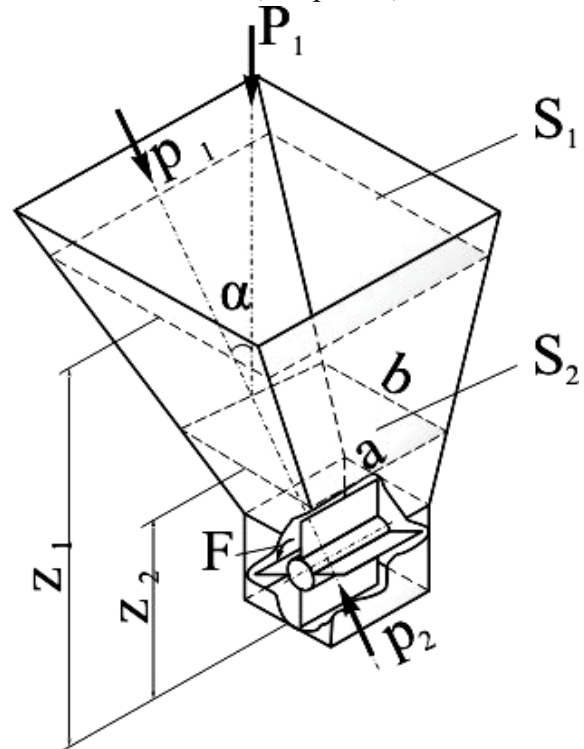


Рис. 1. Схема сил, действующих на ворох люцерны в бункере

**Ли А., Туркменов Х. И., Рузиев Ш.Н.**  
 НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ  
 СЕМЕННОГО ВОРОХА В БУНКЕРЕ КЛЕВЕРОТЕРКИ

Вес рассматриваемой массы вороха люцерны равен:

$$G = mg = \rho Vg = \gamma V; \quad V = \frac{G}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – плотность семенной массы вороха.

Сила  $P$ , под действием которой семенная масса вороха попадает в зону действия лопастей барабана, имеет вид:

$$P = G = \gamma V.$$

Для транспортировки лопастями определенной порции вороха в барабан клеверотерки необходимо условие

$$P < Fm\omega^2 r,$$

где  $F$  – сила, действующая на лопасть барабана.

Таким образом,

$$\rho Sg(z_1 - z_2) + S(p_1 - p_2) = \tau_0 l \chi; \quad \tau_0 l \chi = m\omega^2 r,$$

где  $l$  – путь, пройденный массой вороха в бункере, или расстояние между сечениями  $S_1$  и  $S_2$ .

Величина пути массы вороха, входящей в пространство между лопастями, равна высоте лопастей:

$$P = S(\rho gh + \Delta p) = m\omega^2 r,$$

где  $Sh = V = \frac{h}{3}(S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2); \quad \omega = \sqrt{\frac{S(\rho gh + \Delta p)}{mr}}.$

С другой стороны, величину массы вороха в пространстве между лопастями можно представить в следующем виде:

$$m = \frac{\tau_0 l \chi}{\omega^2 r} \quad \text{или} \quad \frac{\tau_0 l \chi}{9r} = m. \quad (1)$$

Как известно, окружная скорость определяется формулой

$$\vartheta = 2\pi r n,$$

где  $r$  – радиус вала;  $n$  – число оборотов.

Тогда после преобразований выражение массы (1) принимает следующий вид:

$$m = \frac{\tau_0 l \chi}{2\pi r^2 n}.$$

Площадь, занимаемая семенным ворохом в бункере, равна:

$$\chi = \pi \left( r + \frac{l}{2} \right) + 2l.$$

Площадь поперечного сечения или сектора семенного вороха, находящегося в барабане, можно определить из разности двух площадей (см. рис. 2, 3)

$$S_{\text{секABC}} = \frac{\pi(r+l)^2 n^\circ}{360^\circ} \quad \text{и} \quad S_{\text{секEAK}} = \frac{\pi r^2 n^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{2} r^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  – центральный угол, рад;

$$S_{\text{ВЕКС}} = S_{\text{секABC}} - S_{\text{секEAK}} = \frac{\pi(r+l)^2 n^\circ}{360^\circ} - \frac{\pi r^2 n^\circ}{360^\circ} = \frac{\pi n^\circ}{360^\circ} (2rl + l^2).$$

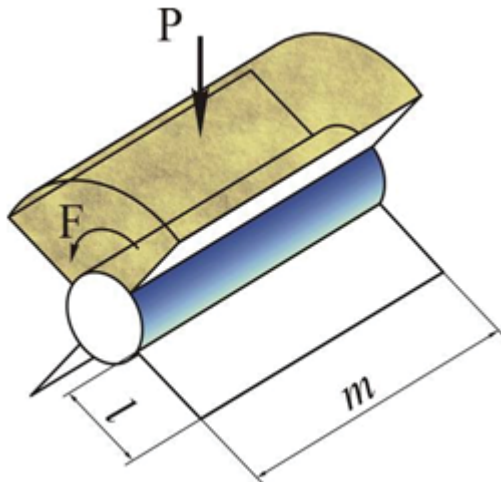


Рис. 2. Схема движения потока семенного вороха



Рис. 3. Профиль схемы движения потока семенного вороха

Объем  $\frac{1}{4}$  части объема массы вороха между лопастями барабана имеет вид

$$V'_n = \frac{\pi(2rl + l^2)m}{4}$$

Из уравнения неразрывности  $S_1 u_1 = S u = Q$  следует, что подача по всему объему бункера не меняется, т.е. масса семенного вороха в нем распределена равномерно. Из условия равномерности вытекает условие работы лопастного барабана.

Лопастной вал барабана вращается с угловой скоростью  $\omega$ , масса семенного вороха равномерно поступает в пространство между лопастями со скоростью  $\mathcal{G}_1$ , которая равна сумме первоначальных скоростей семенного вороха  $u_1$  и угловой скорости относительного вращения лопастей  $\omega_1$  (см. рис. 4).

Также можно определить скорость выхода массы вороха из лопастей. Ее абсолютное значение равно  $C_2$ , которое равно сумме линейных скоростей массы вороха и относительной угловой скорости  $\omega_2$ . Давление на массу семенного вороха при входе равно  $P_1$ , а при выходе –  $P_2$ .

При таких допущениях уравнение Бернулли имеет вид

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\omega_2^2}{2g} - H_k + h_{1-2}, \quad (2)$$

где  $H_k$  – давление, создаваемое центробежной силой;  $h_{1-2}$  – потери между сечениями;  $P_1 = P_2$  – граница активности давлений, определяемая из условия

$$\frac{\mathcal{G}_1^2}{2g} = \frac{\mathcal{G}_2^2}{2g}$$

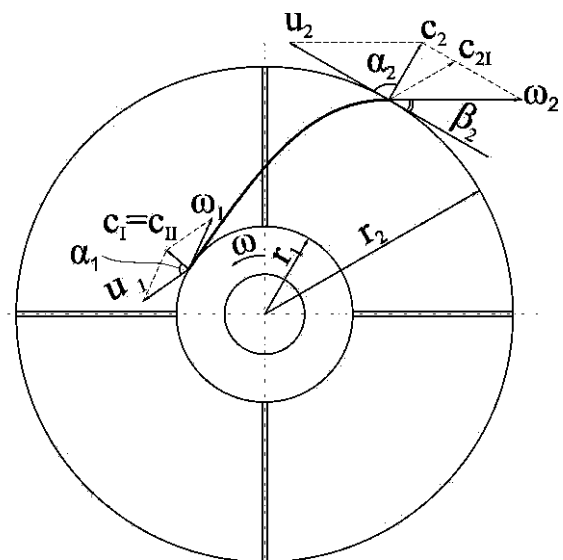


Рис. 4. Схема движения частицы семенного вороха люцерны в лопастном барабане

Если лопастной вал вращается с угловой скоростью  $\omega$  и на частицу семенного вороха с массой  $m$  действует сила тяжести  $G$ , то выполненная работа для преодоления расстояния  $r_2 - r_1$  равна

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{G}{g} \omega^2 r dr = \frac{G\omega^2}{2g} (r_2^2 - r_1^2).$$

Учитывая, что  $\omega^2 r_2^2 = u_2^2$  и  $\omega^2 r_1^2 = u_1^2$ , выполненную работу можно представить в следующем виде:

$$A = G \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}. \quad (3)$$

Из выражения (3) можно определить давление на частицу вороха, создаваемую лопастями барабана с угловой скоростью  $\omega$ :

$$H_k = \frac{A}{G} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}.$$

Тогда после преобразований уравнение Бернулли (2) примет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\omega_2^2}{2g} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_{1-2}.$$

Давление на входе в пространство между лопастями барабана составляет:

$$H_1 = z_1 = \frac{P_1}{2g} + \frac{\vartheta_1^2}{2g}.$$

Давление на выходе из пространства между лопастями барабана равно:

$$H_2 = z_2 = \frac{P_2}{2g} + \frac{\vartheta_2^2}{2g} - h_{1-2}.$$

Разность давлений  $H = P = P_{вх.} - P_{вых.}$  при входе и выходе является внутренним давлением

$$P = z_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\vartheta_2^2}{2g} + h_{1-2} - \left( z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\vartheta_1^2}{2g} \right). \quad (4)$$

После преобразований выражения (4) получим формулу для определения внутреннего давления

$$H = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g} + \frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}. \quad (5)$$

Угловые скорости входящего и выходящего потоков массы семенного вороха соответственно равны:

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= u_1 + \vartheta_1 - 2u_1\vartheta_1 \text{Cos}\alpha_1, \\ \omega_2^2 &= u_2 + \vartheta_2 - 2u_2\vartheta_2 \text{Cos}\alpha_2. \end{aligned}$$

Если углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  принять равными  $90^\circ$ , то и масса семенного вороха поступает в пространство между лопастями под углом  $90^\circ$ , т.е. параллельно радиусу вращающегося вала, тогда  $\text{Cos}\alpha_1 = 0$ . Учитывая данный фактор и после преобразования уравнения (5), получим выражение для определения внутреннего давления

$$H = \frac{u_2\vartheta_2 \text{Cos}\alpha_2}{g}. \quad (6)$$

Если поток массы семенного вороха от поверхности лопастного барабана сходит под углом  $\beta_2$ , то формула косинусов двух углов может быть представлена в виде:

$$\vartheta_2 \text{Cos}\alpha_2 = u_2 - \omega_2 \text{Cos}\beta_2.$$

При равных значениях углов выражение для определения внутреннего давления (6) примет вид:

$$H = \frac{u_2}{2g} \left( 1 - \frac{\omega_2^2}{u_2} \cos \beta_2 \right). \quad (7)$$

Анализ полученного выражения (7) показывает:

- что давление внутри лопастного барабана пропорционально количеству лопастей, так как  $u_2 = \pi d_2 n$ , где  $n$  – количество лопастей;

- давление в пространстве между лопастями зависит не только от количества лопастей, но и от их формы;

- если кривизна лопастей наклонена в сторону вращения вала, т.е. угол  $\beta_2 > 90^\circ$ , а  $\cos \beta_2 < 0$ , то давление имеет положительное значение

$$\left( 1 - \frac{\omega_2^2}{u_2} \cos \beta \right) > 1 \quad \text{или} \quad H > \frac{u_2^2}{2g};$$

- если кривизна лопастей наклонена в противоположную сторону вращения вала, т.е.  $\beta_2 < 90^\circ$ , а  $\cos \beta_2 > 0$ , то давление имеет отрицательное значение:

$$\left( 1 - \frac{\omega_2^2}{u_2} \cos \beta \right) < 1;$$

- если кривизна лопастей направлена вдоль радиуса, т.е.  $\beta_2 = 90^\circ$ , а  $\cos \beta_2 = 0$ , то давление равно нулю

$$H_k = \frac{u_2^2}{2g}.$$

Отсюда следует, что для достижения оптимального значения внутреннего давления лопасти дозирующего барабана относительно оси вала должны быть расположены под углом  $16...30^\circ$ .

Следует учитывать, что с уменьшением угла  $\beta_2$  частота вращения вала увеличивается

$$U_2 = \pi d n.$$

Известно, что отношение фактического давления на теоретическое давление является коэффициентом  $\eta$  полезного действия (КПД)

$$\eta = \frac{H_{np}}{H_n}. \quad (8)$$

Тогда из выражения (8) можно определить фактическое давление, которое равно:

$$H_{np} = H \eta = \eta \frac{u_2 \vartheta_2 \cos \alpha_2}{g},$$

или

$$H_n = \frac{u_2 \vartheta_2 \cos \alpha_2 - u_1 \vartheta_1 \cos \alpha_1}{g}.$$

Полезное давление

$$H_n = H \eta \xi.$$

Число лопастей определяется по формуле

$$n = 2k \frac{r_m}{l} \sin \beta_m,$$

где  $r_m$  – радиус силы тяжести лопастей, м;  $l$  – длина лопастей, м;  $\beta_m$  – среднеарифметическое значение углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , град.

Приведенный выше теоретический анализ касается только отдельных частиц массы семенного вороха.

В многофазную среду легко перейти, используя следующее выражение:

$$\mathfrak{G}_1^* = \mathfrak{G} - \frac{(f_1 + \rho f_2) \hat{\mathfrak{G}}_{\text{см}} - \mathfrak{G}_{\text{см}}^*}{(\rho - 1) f_1} = f_1 \rho \hat{\mathfrak{G}}_{\text{см}} - f_1 \mathfrak{G}_{\text{см}} - f_2 \mathfrak{G}_{\text{см}}.$$

В этом случае уравнение Бернулли примет следующий вид:

$$z_1 - z_2 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{\rho_1 \mathfrak{G}_1^2}{2} + \frac{\rho_2 \mathfrak{G}_2^2}{2} \right] = \frac{\tau_0 \chi P}{\gamma S}.$$

В случае, когда компоненты массы семенного вороха несжимаемы, т.е.  $\rho_{li} = \text{const}$  и  $\rho_{2i} = \text{const}$ , то скорости каждого компонента определяются следующими формулами:

$$\bar{\mathfrak{G}}_1 = \frac{\rho \hat{V}_{\text{см}} - (f_1 + \rho f_2) \bar{\mathfrak{G}}_{\text{см}}}{f_1 (\rho - 1)},$$

$$\bar{\mathfrak{G}}_2 = \frac{\rho \hat{\mathfrak{G}}_{\text{см}} - (f_1 + \rho f_2) \bar{\mathfrak{G}}_{\text{см}}}{f_2 (\rho - 1)}.$$

Семенной ворох люцерны по морфологическому составу состоит из органических и минеральных примесей, поэтому для процесса вытирания бобиков семян необходимо использовать известные теоретические предпосылки.

### **Заключение**

На качество перетирания и предварительной очистки семенной биомассы люцерны при установившемся режиме работы клеверотерки существенное влияние оказывает режим работы дозирующего барабана и его геометрические размеры.

Угловая скорость дозирующего барабана отстает от угловой скорости барабана клеверотерки из-за разности их окружных скоростей, следовательно, производительность клеверотерки преобладает по сравнению с производительностью дозирующего барабана.

Полученные теоретические зависимости можно использовать при оптимизации конструктивных элементов бункера клеверотерки и режимов работы аппарата.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дринча, В. М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки / В. М. Дринча. – Воронеж: НПО «Модэк», 2006. – 384 с.
2. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2 / Н. А. Кильчевский. – М.: Наука, 1977. – 544 с.
3. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2 / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лупц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1985. – 496 с.
4. Богомягких, В. А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов / В. А. Богомягких. – Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1973. – 152 с.
5. Зенков, Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 252 с.

**Ханов В. А., Марьин Б. Н., Фролов Д. Н., Куриная Н. П., Шпорт Р. В.**  
**V.A. Khanov, B.N. Maryin, D.N. Frolov, N.P. Kurinaja, V.I. Shport**

## **НЕОБХОДИМОСТЬ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В РАМКАХ КРУПНОЙ КОРПОРАЦИИ**

### **CENTRALIZED MANAGEMENT OF AUTOMATION PROCESSES IN A LARGE COMPANY**

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [maryinsb@mail.ru](mailto:maryinsb@mail.ru).

**Mr. Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681013, 27 Lenin Pr. E-mail: [maryinsb@mail.ru](mailto:maryinsb@mail.ru).



**Фролов Дмитрий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [frolov.dnn@mail.ru](mailto:frolov.dnn@mail.ru).

**Mr. Dmitriy N. Frolov** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenin Pr. E-mail: [frolov.dnn@mail.ru](mailto:frolov.dnn@mail.ru).



**Ханов Владимир Андреевич** – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела информационных технологий ОАО «Амурский судостроительный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Аллея Труда, 1. E-mail: [vladimir.khanov@gmail.com](mailto:vladimir.khanov@gmail.com).

**Mr. Vladimir A. Khanov** – PhD in Engineering, Deputy Head of the Information Technology Department, OJSC "Amursky sudostroitelny zavod" (OJSC Amur Shipbuilding Plant (Komsomolsk-on-Amur), 1, Truda Alley. E-mail: [vladimir.khanov@gmail.com](mailto:vladimir.khanov@gmail.com).



**Куриная Наталья Петровна** – старший преподаватель кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru).

**Ms. Natalya P. Kurinaja** – Senior Lecturer, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27, Lenin St. E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru).

**Шпорт Роман Вячеславович** – заместитель начальника департамента «гражданские самолёты Сухо-го» (Россия, Москва). E-mail: [R\\_Shport@scac.ru](mailto:R_Shport@scac.ru).

**Mr. Roman V. Shport** – Deputy Head of the Department of the Sukhoi Civil Aircraft Company, Moscow. E-mail: [R\\_Shport@scac.ru](mailto:R_Shport@scac.ru).

**Аннотация.** Приведены результаты анализа состояния процесса автоматизации информационной поддержки принятия решений в судостроительной отрасли. Предложено внедрение централизованного управления бизнес-процессами на основе концептуальной модели CALS.

**Summary.** The paper reviews the state-of-the-art automation of decision support systems in the shipbuilding industry. Suggested is a centralized system for management of business processes based on the CALS conceptual model (standard).

**Ключевые слова:** автоматизация, судостроение, информационная поддержка, управление, принятие решений, централизация, концептуальная модель.

**Key words:** automation, shipbuilding, information support, management, decision-making, centralization, conceptual model.

УДК 658.5

В настоящее время судостроение в России с созданием ОАО «Объединённая судостроительная корпорация» (ОСК) вступило в фазу своего возрождения и дальнейшего развития. Очевидно, что судостроительная промышленность является одной из наиболее сложных отраслей как с технологической точки зрения, так и с точки зрения объёмов производства. А с учётом объединения большого количества крупных и мелких верфей в структуру с единым центром управления и связанной с этим реорганизации и унификации бизнес-процессов российское судостроение начинает испытывать потребность в повышении качества и усилении информационного обеспечения процессов принятия решений на всех уровнях управленческой иерархии – от корпоративного до отдельных технологических процессов.

Структура ОСК очень сложна в связи с тем, что объединяет в себе предприятия и организации различных сфер деятельности: верфи, судоремонтные предприятия, конструкторские бюро, научные центры, снабжение, производства судового оборудования и электроники, управляющие центры и т.д. Несомненно, что такое объединение само по себе очень сложно в управлении. Современные правила ведения бизнеса диктуют массу условий, ключевым из которых, на наш взгляд, является получение информации о состоянии бизнес-процессов в режиме on-line, необходимой для принятия эффективных управленческих решений.

Решить эту задачу возможно с применением подхода CALS, что доказывает успешность применения технологий в отечественном авиастроении, которое по технологичности и сложности не уступает судостроению. Создание единого информационного пространства (ЕИП) в рамках объединяющего центра управления и подчинённых организационных структур, несомненно, позволит в оперативном режиме осуществлять мониторинг состояния производственных и обеспечивающих процессов на всех предприятиях, что, в свою очередь, даст положительный эффект при принятии как стратегических, так и тактических управленческих решений. Это достигается за счёт консолидации информации в единой системе, что позволит добиться её своевременное поступление и обработку.

Решение задачи улучшения информационной поддержки принятия решений на всех уровнях в судостроительной промышленности, на наш взгляд, есть важнейший из шагов на пути повышения конкурентоспособности продукции как на внутреннем рынке, так и на внешних рынках – наиболее важных для развития и модернизации экономики (задача, поставленная руководством страны).

По вопросам автоматизации управления в российском судостроении накоплен немалый опыт, который даже в период упадка не был растрачен. На его основе на предприятиях силами отделов автоматизированных систем управления предприятием реализованы различные корпоративные и технологические бизнес-приложения. Например, в ОАО «Амурский



судостроительный завод» (АСЗ) в рамках корпоративной информационной системы (КИС) реализована автоматизированная система технической подготовки производства (АСТПП), которая позволяет выполнять конструкторское и технологическое сопровождение проекта, что даёт возможность осуществлять планирование закупок. Очевидно, что этого недостаточно для осуществления полноценной информационной поддержки принятия управленческих решений. В настоящее время проводится модернизация системы, которая позволит осуществлять планирование и управление всем проектом в рамках единой КИС.

Однако существует серьёзная проблема, связанная с ограниченностью ресурсов, которая делает разработку всех необходимых приложений информационной системы отдельно взятого предприятия невозможной в обозримом будущем, тем более невозможно распространение этих приложений и на вышестоящем управленческом уровне.

В настоящее время на большинстве предприятий, входящих в состав ОСК, происходит внедрение Единого стандарта управленческого учёта, в качестве основы автоматизации были взяты бизнес-приложения, основанные на платформе «1С:Предприятие». Опять же в условиях ограниченности ресурсов решение использовать готовые разработки явилось наиболее оптимальным. Но и это решение имеет ряд недостатков, один из которых заключается в том, что готовые информационные системы (ИС) не учитывают специфики судостроительного производства, его нюансов. Также готовые приложения сложно интегрировать с уже функционирующими ключевыми ИС, не приводя к остановке производства. Например, на АСЗ программисты вынуждены постоянно осуществлять синхронизацию баз данных КИС и «1С:Предприятие» для обеспечения целостности и непротиворечивости данных, что требует достаточно больших машинных ресурсов. Следовательно, подобные ИС требуют доработки и адаптации под принятую в отрасли производственную культуру либо необходимо создание совершенно иных интегрированных приложений. Но и здесь есть проблема – разрозненные доработки и разработки программного обеспечения никогда не приведут к созданию унифицированной и эффективной системы управления. В этом случае огромные ресурсы будут расходоваться впустую.

Отдельно необходимо сказать о тенденции внедрения программного обеспечения, предназначенного для решения ограниченного круга задач, например PDM-система, без интеграции с автоматизированными системами организации снабжения либо финансовыми системами. Следствием такого подхода является невозможность создания ЕИП и, следовательно, отсутствие эффективной системы взаимодействия приложений. Это становится непреодолимым препятствием к созданию эффективной системы управления, опирающейся на консолидированную информацию, представляющую собой единую картину состояния предприятия.

Целесообразным, на наш взгляд, является создание в рамках ОСК такой организационной единицы, которая сможет осуществлять централизованное управление бизнес-процессами и проводить эффективную информатизацию входящих в состав корпорации предприятий, включающую в себя, в том числе, разработку централизованной автоматизированной информационной системы в рамках концептуальной модели CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support), или ИПИ (Информационная Поддержка процессов жизненного цикла Изделий) – формулировка, адаптированная к пониманию отечественными специалистами.

На рис. 1 приведена схема, отражающая сущность концепции CALS. Согласно этой схеме, ядро ИПИ составляет интегрированная информационная среда (ИИС), или ЕИП.

**Ханов В.А., Марьин Б.Н., Фролов Д.Н., Куриная Н.П., Шпорт Р.В.**  
**НЕОБХОДИМОСТЬ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ**  
**В РАМКАХ КРУПНОЙ КОРПОРАЦИИ**

ИИС представляет собой совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающих корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, участвующим в осуществлении жизненного цикла (ЖЦ) изделия, кому это необходимо и разрешено. Все сведения (данные) в ИИС хранятся в виде информационных объектов. В ИИС действует единая система правил представления, хранения и обмена информацией.

В ИИС протекают информационные процессы, сопровождающие и поддерживающие ЖЦ изделия на всех его этапах. Здесь реализуется главный принцип ИПИ: информация, однажды возникшая на каком-либо этапе ЖЦ, сохраняется в ИИС и становится доступной всем участникам этого и других этапов (в соответствии с имеющимися у них правами пользования этой информацией). Это позволяет избежать дублирования, перекодировки и несанкционированных изменений данных, избежать связанных с этими процедурами ошибок и сократить затраты труда, времени и финансовых ресурсов.



Рис. 1. Схема концептуальной модели CALS – ИПИ

Основное содержание ИПИ, принципиально отличающее эту концепцию от других, составляют инвариантные понятия, которые реализуются (полностью или частично) в течение ЖЦ изделия. Эти инвариантные понятия условно делятся на две группы:

- 1) основные ИПИ-принципы;
- 2) базовые ИПИ-технологии.

К числу первых относятся:

- анализ и реинжиниринг бизнес-процессов (Business-processes analysis and reengineering);
- безбумажный обмен данными (Paperless data interchange) с использованием ЭЦП;
- параллельный инжиниринг (Concurrent Engineering);
- системная организация постпроизводственных процессов ЖЦ изделия (интегрированная логистическая поддержка).

К числу вторых относятся:



- управление проектом (Project Management);
- управление данными об изделии (Product Data Management);
- управление конфигурацией изделия (Configuration Management);
- управление ИИС, в том числе информационными потоками (Information Management);
- управление качеством (Quality Management);
- управление потоками работ (Workflow Management);
- управление изменениями производственных и организационных структур (Change Management).

ИПИ-технологии реализуются силами многопрофильных рабочих групп, объединяющих в своем составе экспертов различных специальностей. Нормативную базу разработок составляют международные и национальные стандарты, регламентирующие различные аспекты ИПИ-технологий.

В ИИС информация создается, преобразуется, хранится и передается от одного участника ЖЦ к другому при помощи программных средств, объединенных на схеме (см. рис. 1) в блок «Инструментарий». К числу таких средств относятся:

- автоматизированные системы конструкторского и технологического проектирования (CAE/CAD/CAM);
- программные средства управления данными об изделии (изделиях) (PDM);
- автоматизированные системы планирования и управления производством и предприятием (MRP/ERP);
- программно-методические средства анализа логистической поддержки и ведения баз данных по результатам такого анализа (LSA/LSAR);
- программные средства управления потоками работ (WF);
- методология и программные средства моделирования и анализа бизнес-процессов (SADT) и др.

Принятие и внедрение представленной концептуальной модели в рамках корпорации, на наш взгляд, несомненно, позволит достигнуть базовой цели создания ЕИП. Успешность применения подобного подхода можно увидеть, например, на корейских судостроительных верфях, таких как SHI (Samsung Heavy Industries), ННН (Hyundai Heavy Industries) и т.д., которые, имея собственные ИТ-подразделения, имеют возможность разрабатывать корпоративные информационные системы, полностью удовлетворяющие корпоративным потребностям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин, А. Г. Информационные технологии в наукоемком машиностроении / А. Г. Братухин [и др.]. – Киев: Техника, 2001. – 728 с.
2. Гейтс, Б. Бизнес со скоростью мысли / Б. Гейтс. – 2-е изд., испр. – М.: Эксмо, 2006. – 480 с.
3. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия / В. В. Бакаев, Е. В. Судов, Б. Н. Марьин [и др.]; под ред. В. В. Бакаева. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 624 с.
4. Судов, Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели / Е. В. Судов. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.

**Степаненко В. Е., Фролов Д.Н. Марьин Б.Н.**

МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

**Степаненко В. Е., Фролов Д. Н. Марьин Б. Н.**

**V.E. Stepanenko, D.N. Frolov, B.N. Maryin**

**МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**SIMULATION METHOD OF PRODUCTION PROCESS ORGANIZATION USING  
EXPANDED PETRI NETS**

**Степаненко Виктор Евгеньевич** – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vices@rambler.ru.

**Mr. Victor E. Stepanenko** – PhD Candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: vices@rambler.ru.

**Фролов Дмитрий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

**Mr. Dmitry N. Frolov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr. Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

**Аннотация.** Рассмотрена проблема формирования формального аппарата для анализа организации дискретных металлургического и машиностроительного производств. Проанализированы существующие теории, в рамках которых может быть сформирован метод моделирования для проведения анализа. Обоснован выбор в пользу расширенных сетей Петри. Указаны основные положения разрабатываемого метода.

**Summary.** The paper considers the problem of building a formal framework for the analysis of the organization of discrete metallurgical and machine-building industries. Existing theories are analyzed in the framework of which the method of simulation for such analysis can be developed. The choice of expanded Petri nets is substantiated. Key principles of the method being developed are specified.

**Ключевые слова:** дискретный производственный процесс, моделирование и анализ, расширенные сети Петри.

**Key words:** discrete industry, simulation and analysis, expanded Petri nets.

УДК 519.876

Традиционными типами производства для металлургических и машиностроительных предприятий являются серийное и массовое производства. Эти типы характеризуются ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями, и сравнительно большим объемом выпуска. Такие методы группируют похожие станки и станки, создавая рабочие ячейки или цеха, которые обычно располагаются в разных местах производственного помещения, и работа перемещается из цеха в цех, пока изготовление изделия не будет выполнено в срок. Массовое и серийное производства стали классиче-



ским примером организации производственного процесса. Эти производства позволяют повысить производительность станков и людей при изготовлении больших объемов продукции. В условиях плановой экономики стабильный объем выпуска, а следовательно, и равномерная загрузка мощностей обеспечивались государственным заказом. Этот факт являлся гарантом успешного функционирования предприятия.

В условиях рыночной экономики государственный заказ перестает быть мощным фактором развития организации. Отсутствие стабильного государственного заказа бросило вызов многим предприятиям металлургической и машиностроительной отраслей, заставляя подстраиваться под рыночный спрос на свою продукцию. Столь эффективная, привычная всем форма организации производства начала становиться бременем. Многие предприятия, не сумевшие перестроиться или найти рынки сбыта собственной продукции, перестали существовать, а те, что выжили, были вынуждены резко сократить численность персонала и заморозить собственные мощности.

В этих условиях появляется необходимость в создании гибкой производственной системы, позволяющей в быстрые сроки изготавливать разные виды продукции в том количестве, которое необходимо рынку без создания избыточных производственных затрат. Альтернативой серийному производству в мировой практике производственного менеджмента многие авторы [6; 4; 7] считают бережливое производство «по одному». Данный метод организации производственного процесса позволяет выполнять работу без задержек и остановок. Действия, не добавляющие в продукт стоимость, здесь считаются бесполезными и устраняются путем соединения рабочих этапов друг с другом и уравнивания объемов работы. Благодаря этому продукты поглощаются напрямую последующими рабочими шагами, по одному за один период времени, вплоть до завершения изделия. Такая последовательность производства позволяет получить разные виды конечного продукта ровно за то время, которое действительно необходимо для его выработки. Время ожидания, время простоя в очереди и другие задержки в бережливом производстве рассматриваются как бесполезные и значительно сокращаются или ликвидируются.

Первоочередной задачей производственного менеджера в процессе создания отдельных бережливых линий на предприятии является анализ существующей ситуации – анализ производственного процесса. Являясь объектом сложным, производственные процессы требуют четко формализованной методики проведения процедуры анализа существующих и их преобразования в новые, удовлетворяющие критерию оптимальности (в зависимости от целей преобразования разные – минимизация времени, стоимости и др.). Вопросам создания методики анализа производственных процессов посвящена данная работа.

Опишем основные характеристики процесса производства с точки зрения его организации и функционирования во времени. Дискретным принято считать такой тип производства, в котором исходный материал (сырье) при переработке в конечный продукт претерпевает более одного передела с прерыванием технологического процесса. Металлургическое и машиностроительное производства с их последовательным выполнением нескольких операций, несомненно, являются дискретными. Кроме того, выполнение этих операций происходит продолжительное время, что обуславливает необходимость рассмотрения процесса как динамического объекта. Сложность конечного продукта, его многокомпонентность и иерархическая структура этих компонентов обуславливают иерархическую характеристику процесса производства. Кроме того, данные процессы носят вероятностный (стохастический) характер. Такое заключение можно сделать, проанализировав факторы, влияющие на ход этих процессов (поломка оборудования, задержка ресурсов, колебание спроса на продукцию и др.).

Теперь выделим основные элементы процесса с точки зрения динамики его функционирования. Какова же структура данных элементов? Выдающийся японский менеджер и один из основоположников принципов бережливого производства Сигео Синго [6] выделил следующие основные компоненты производственного процесса:

– *обработка* – физическое изменение материала или его качества;  
– *контроль* – сравнение со стандартом;  
– *транспортировка* – перемещение материалов или изделий, изменение их положения в пространстве;  
– *задержка* – период времени, в течение которого не происходит обработка, контроль или транспортировка.

Кроме того, задержку можно разделить на два типа:

1) *задержка процесса* – вся партия ждет, когда предыдущая партия обрабатывается, контролируется или транспортируется;

2) *задержка партии* – одно изделие обрабатывается, а другие ждут обработки или завершения обработки деталей всей партии. Такой вид задержки возможен также при контроле и транспортировке.

Зачастую указанные компоненты выполняются как последовательно, так и параллельно, например: одновременная параллельная сортовая прокатка стали в несколько нитей в металлургии; одновременная параллельная механическая обработка составных частей крыла самолета перед этапом агрегатной сборки (механообработка происходит параллельно на разных станках), следовательно, процессу производства характерен параллелизм. Таким образом, производственную систему машиностроительного предприятия можно отнести к динамическим дискретным системам со стохастическими последовательно-параллельными многоуровневыми (иерархическими) процессами.

Для формального описания подобных систем наиболее известны методы и модели, которые построены на основе теорий: конечных автоматов [2]; сетей систем массового обслуживания, или стохастических сетей; систем временной логики [1], классических и расширенных сетей Петри [3; 5].

Метод *конечных автоматов* представляет дискретную динамическую систему в виде набора состояний, связанных друг с другом дугами. В соответствии с этим методом в каждый момент времени описываемая система может находиться в одном из состояний. При определенном воздействии на систему она может перейти из текущего состояния по дуге, ведущей в новое состояние. При таком переходе система обычно генерирует некоторый выходной сигнал или реализует некоторую операцию. Основная область использования конечных автоматов – это сосредоточенные дискретно событийные системы. При использовании данного аппарата применительно к производственным системам возникает ряд проблем, одна из них состоит в том, что конечный автомат отражает лишь последовательные события и малопригоден для представления их возможного параллелизма. Наконец, конечные автоматы неудобны для иерархического, т.е. многоуровневого, представления системы, что очень часто бывает необходимо для упрощения их описания. Вследствие этих причин конечные автоматы редко применяются для формализации производственных систем с большой сложностью структуры протекающих в них процессов.

*Стохастические сети* представляют собой совокупности взаимосвязанных простых систем массового обслуживания (СМО) [1]. Эти сети часто применяются для оценки характеристик функционирования транспортных систем, коммуникационных систем и вообще любых систем, которые могут быть представлены в форме графа с узлами, осуществляющими некоторые операции. Динамическими объектами стохастической сети служат запросы на обслуживание, которые проходят через ряд узлов обслуживания, перемещаясь по дугам, связывающим разные узлы, в общем случае запросы порождаются окружающей средой и после завершения обслуживания покидают сеть. Таким образом, окружающая среда как источник запросов должна учитываться при рассмотрении стохастической сети. Существенно, что интервалы обслуживания запросов отдельными узлами сети имеют случайную длительность, а обслуженный запрос передается в другой узел с некоторой вероятностью. Этим и объясняется название «стохастические сети».

Применительно к производственной системе каждый её узел (выполняемая операция или их набор) можно формально представить некоторой системой массового обслуживания. Соединив ориентированными дугами системы массового обслуживания, в соответствии с реальными связями между этими системами, получаем стохастическую сеть, представляющую данную производственную систему. После этого существующими методами можно аналитически вычислить различные характеристики функционирования данной производственной системы: время реакции, пропускную способность, загруженность узлов, обработку запросов и т.п. Однако возможности аппарата стохастических сетей для описания и исследования таких сложных производственных систем ограничены. Это объясняется, прежде всего, тем, что не для всех сетей существуют аналитические решения. Даже если аналитическое решение существует, оно может оказаться слишком сложным вследствие большого числа компонентов, образующих моделируемую систему. Наконец, в терминах стохастических сетей нельзя выразить различные аспекты синхронизации процессов (операций процесса), играющие исключительно важную роль в поведении системы. Вследствие этих причин метод стохастических сетей может играть лишь вспомогательную роль в исследовании производственных систем (например, при изучении таких их отдельных компонентов, как динамика склада или производственного участка.)

Обратимся теперь к *методу временной логики*. Этот метод ориентирован на описание и анализ параллельных процессов в терминах событий, находящихся в определенных отношениях друг с другом во времени [1]. В методе временной логики используется ограниченный набор операторов, из которых важнейшими являются операторы «всегда», «иногда» и «следующий». Путем комбинации этих операторов на множестве предикатов можно выражать различные временные отношения между событиями и процессами. Временная логика построена по классической схеме математической системы. В ней определено множество примитивных символов (символы предикатов, операторы классической логики, операторы временной логики), специфицированы правила вывода правильно построенных формул (эти правила включают в себя аксиомы исчисления высказываний и временные аксиомы), а также дан набор теорем, который при необходимости может быть расширен применением аксиом, правил вывода и доказанных теорем. Смысл временной логики основан на понятии состояния и последовательности выполнения процесса. С помощью этих понятий удастся проводить формальное доказательство таких важных свойств параллельных процессов, как безопасность и живость. К сожалению, во временной логике в явном виде отсутствует понятие параллелизма процессов. На языке временной логики поведение любой системы разбивается на отдельные события, между которыми задаются различные временные отношения. Однако в реальной системе не для каждой пары событий существует отношение временной упорядоченности. Этот недостаток ограничивает применение временной логики в основном исследовании систем, имеющих общее адресное пространство. Существенным недостатком временной логики является сложность и громоздкость формальных доказательств. Поэтому можно утверждать, что метод временной логики едва ли пригоден для описания и анализа производственных систем.

Применительно к таким сложным динамическим системам, которыми являются производственные системы, выбираемый аппарат должен не только допускать достаточно простой формальный анализ с необходимой графической поддержкой, но и позволять проведение имитационного моделирования, в чем почти всегда возникает необходимость при изучении сложных систем. Таким аппаратом служат сети Петри (для формального анализа) и их расширения (для имитационного моделирования). Именно этот аппарат лег в основу предлагаемого нами метода, позволяющего анализировать разнообразные производственные процессы.

Построение моделей систем в виде сетей Петри заключается в следующем:

1) Моделируемые процессы описываются множеством событий (действий) и условий определяющих возможность наступления этих событий, а также причинно-следственными отношениями, устанавливаемыми на множестве пар «события-условия».

2) Определяются события-действия, последовательность выполнения которых управляется состояниями системы. Состояния системы задаются множеством условий, формируемых в виде предикатов. Количественно условия характеризуются величиной, которая выражается числами натурального ряда.

3) Условия, в зависимости от значений их количественных характеристик, могут выполняться или нет. Выполнение условий обеспечивает возможность реализации событий. Условия, с фактом выполнения которых связывается возможность реализации событий, называются предусловиями. Реализация события обеспечивает возможность выполнения других условий, находящихся с предусловиями в причинно-следственной связи. Эти условия называются постусловиями. В сетях Петри условия – это позиции, а события – переходы. Изображение позиции и перехода на графе показано на рис. 1.



Рис. 1. Изображение позиции (а) и перехода (б)

Как уже говорилось ранее, производственный процесс можно разделить на следующие компоненты: *обработка, контроль, транспортировка, задержка*. Рассмотрим каждый из них.

Для моделирования *транспортировки* в общем случае может быть применена сеть, изображенная на рис. 2, а. В случае, если необходимо смоделировать транспортировку с помощью транспортных средств с ограниченной емкостью (грузоподъемностью), может быть применена сеть, изображенная на рис. 2, г. Величина  $n$  моделирует емкость.

*Обработка* имеет несколько вариаций:

– обработка, направленная на изменение физических характеристик ресурса (компонента изделия), например, прокатка и механообработка – изменение геометрии ресурса, превращение заготовки в деталь. Здесь количество ресурсов входных ресурсов равно количеству выходных ресурсов. Данный тип обработки может быть смоделирован при помощи сети, изображенной на рис. 2, а. Кроме того, на рис. 2, г представлен вариант моделирования обработки при помощи производства (оборудования) с ограниченным количеством одновременно обрабатываемых ресурсов  $n$ ;

– *разделение ресурса*. Например, операция раскрыя металлического изделия. Здесь из одного входного ресурса может быть получено более одного выходного ресурса (заготовки, детали). Данный тип представлен на рис. 2, в;

– *сборка* (объединение ресурса). Позволяет смоделировать процесс агрегатной сборки в машиностроительном производстве (рис. 2, б).

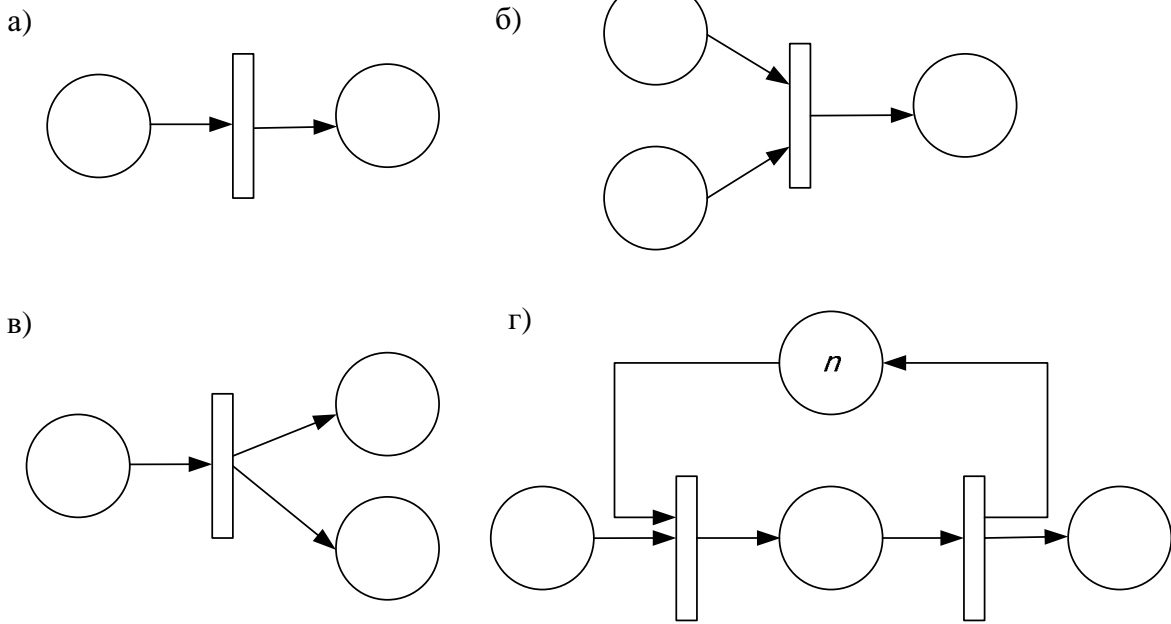


Рис. 2. Элементарные сети Петри для моделирования основных компонентов производственного процесса

Контроль может быть с отправкой брака на специальный склад (буфер) (см. рис. 3, а), либо с отправкой на доработку на предыдущую операцию (см. рис. 3, б).

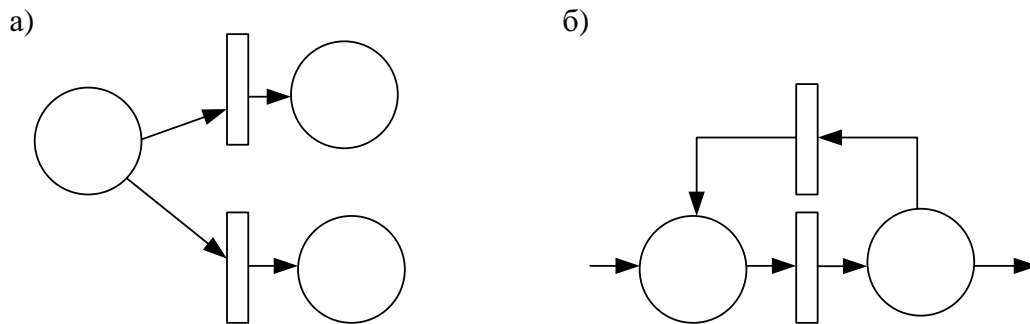


Рис. 3. Элементарные сети для моделирования контроля

Представленные на рис. 2 и 3 элементы сети представляют собой класс классических сетей Петри. Дадим формальное определение. Сеть Петри определяется пятеркой

$$N = \{P, T, J, O, M_0\},$$

где  $P = \{p_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – множество позиций;  $T = \{t_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  – множество переходов;  $J : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  – функция следования;  $O : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  – функция предшествования;  $M_0 : P \rightarrow Z_0$  – начальное маркирование (состояние) сети. Здесь  $Z_0$  – множество положительных целых чисел [4].

Задача моделирования задержки порождает необходимость в использовании временных сетей.

Временная сеть представляется двойкой

$$N_T = \{N, \tau\},$$

где  $N$  – сеть Петри;  $\tau : T \rightarrow R_0$  – функция времён срабатывания, сопоставляющая каждому переходу постоянное время срабатывания;  $R_0$  – множество неотрицательных рациональных чисел.

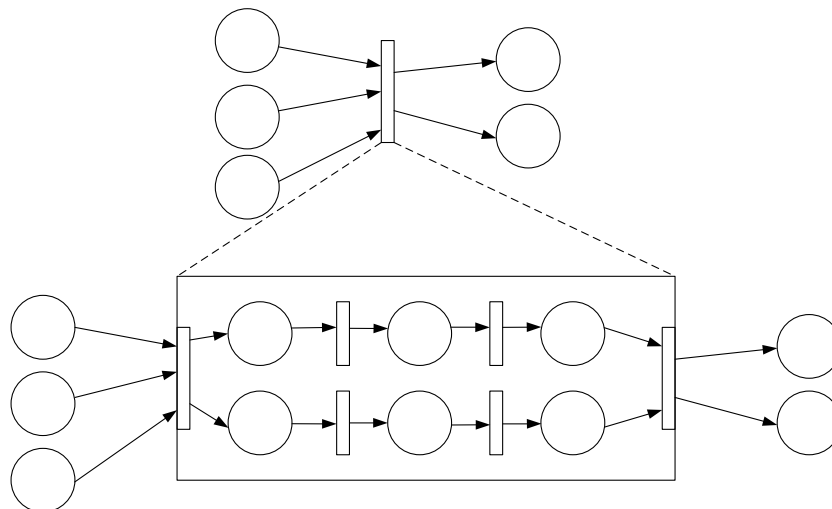


Рис. 4. Декомпозиция перехода сети Петри

Такая сеть позволяет более реалистично отражать производственные процессы. Во временных сетях каждому переходу  $t_j$  сопоставляется время  $\tau_j$ . Если переход возбуждается, то метки, вызвавшие запуск перехода, покидают входные позиции. Порождение меток в выходных позициях происходит через время  $\tau_j$ . Величина  $\tau_j$  является величиной задержки.

Таким образом, определяется способ формализации основных компонентов производственного процесса с точки зрения его организации и движения материального потока.

Однако при построении модели производственного процесса с помощью временной сети Петри возникает необходимость в обеспечении приоритета срабатывания альтернативных переходов как, например, в сети моделирующей контроль (см. рис. 3). Данная задача обуславливает необходимость в использовании механизмов сетей с приоритетами переходов. Временная приоритетная сеть представляется как

$$N_{\text{PRT}} = \{N_T, \text{Pr}\},$$

где  $\text{Pr}$  – отношение приоритетности (порядка), задаваемое на множестве переходов  $T$  и определяющее порядок потребления меток возбуждёнными переходами в условиях конфликта за метку.

В случае с сетями, изображенными на рис. 3, приоритет срабатывания каждого из переходов может быть определен статистически, например, как частота  $P$  появления события, вычисленного по формуле

$$P(A) = m/n,$$



где  $A$  – появления брака при осуществлении обработки или поставки бракованных материалов от поставщика;  $m$  – количество появлений брака;  $n$  – количество всех обработанных или поставленных ресурсов.

Выше уже упоминалось о такой особенности производственных процессов, как иерархическая структура. Иерархию производственного процесса можно формализовать и представить с помощью вложенных сетей (см. рис. 4).

Вложенные сети позволяют значительно упростить процесс построения моделей сложных процессов за счет замены отдельных подсетей на переход. Примером использования данного механизма могут служить представленные на рис. 2, *a* и 2, *г* элементарные сети. Путем замены основного механизма обеспечения емкости средств производства на обычный переход из сети 2, *г* получаем сеть 2, *a*.

При принятии решения об организации производства (производственной линии) лицу, принимающему решение, несомненно, необходимо основываться на фактах. Являясь объектом сложным, производственные процессы требуют четко формализованного метода их анализа. Математический аппарат временных приоритетных и иерархических сетей Петри, имея некоторые преимущества среди прочих средств моделирования производственных процессов, позволяет создать такое средство.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гуц, А. К. Математическая логика и теория алгоритмов: учеб. пособие / А. К. Гуц. – Омск: Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 108 с.
- 2 Хопкрофт, Джон. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений = Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation / Джон Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джеффри Ульман. – М.: Вильямс, 2002. – 528 с.
- 3 Ехлаков, Ю. П. Сети Петри в моделировании бизнес-процессов. Теоретические основы и приложения: монография / Ю. П. Ехлаков, О. И. Жуковский, П. В. Сенченко, В. Ф. Тарасенко; под. ред. проф. Ю.П. Ехлакова. – Томск: ТУСУР, 2007. – 205 с.
- 4 Оно, Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно; пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 208 с.
- 5 Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Джеймс Питерсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
- 6 Синго, С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / Сигео Синго; пер. с англ. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2006. – 312 с.
- 7 Хоббс, Д. П. Внедрение бережливого производства: практическое руководство по оптимизации бизнеса / Денис П. Хоббс; пер. с англ. П. В. Гомолко (гл. 1-3), А. Г. Петкевич; науч. ред. Д. В. Середа. – Минск: Гревцов Паблицер, 2007. – 352 с.

**Черномас В. В., Саликов С. Р.**  
**V.V.Chernomas, S.R.Salikov**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ  
МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ  
И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА**

**TECHNOLOGICAL CRITERION FOR PRODUCING HIGH-QUALITY METAL ITEMS  
AT A CONTINUOUS CASTING/DEFORMATION PLANT**



**Черномас Вадим Владимирович** – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr.Vadim V. Chernomas** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of a Laboratory at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur).



**Саликов Степан Рудольфович** – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr.Stepan R.Salikov** – PhD Candidate, the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Для получения качественных непрерывно литых деформированных заготовок, отвечающим заданным размерно-геометрическим характеристикам и необходимым свойствам, на установке непрерывного литья и деформации металла вертикального типа необходимо учитывать необходимый критерий этого процесса. Этот критерий включает в себя режимы работы устройства, его конструктивные особенности, способы охлаждения и позволяет не только получать качественные металлоизделия, но и обеспечивает безаварийную работу данного устройства.

**Summary.** To produce high-quality continuously cast deformed billets with specified size/geometry and other pre-defined properties at a vertical-type continuous casting and deformation plant, a necessary criterion for this process should be considered. This includes operational modes of the installation, its design, cooling methods; it allows producing high quality metal items, and also ensures failure-free operation of the plant.

**Ключевые слова:** литейно-ковочный модуль, непрерывное литьё, деформация металла, кристаллизатор, технологический критерий.

**Key words:** casting and forging unit, continuous casting, deformation of the metal, mold, Technological criteria.

УДК 621.771:539.3

В институте машиноведения и металлургии ДВО РАН разработана технология и необходимое оборудование для получения металлоизделий способом непрерывного литья и деформации металла (см. рис. 1) [1].

Для обеспечения устойчивости технологического процесса получения металлоизделий на вертикальном литейно-ковочном модуле (ЛКМВ), а главное, получения качественных металлоизделий с заданными размерами и свойствами, необходимо учитывать необходимые характеристики этого процесса. Для ЛКМВ способы охлаждения кристаллизатора и бойка являются наиболее важными характеристиками.

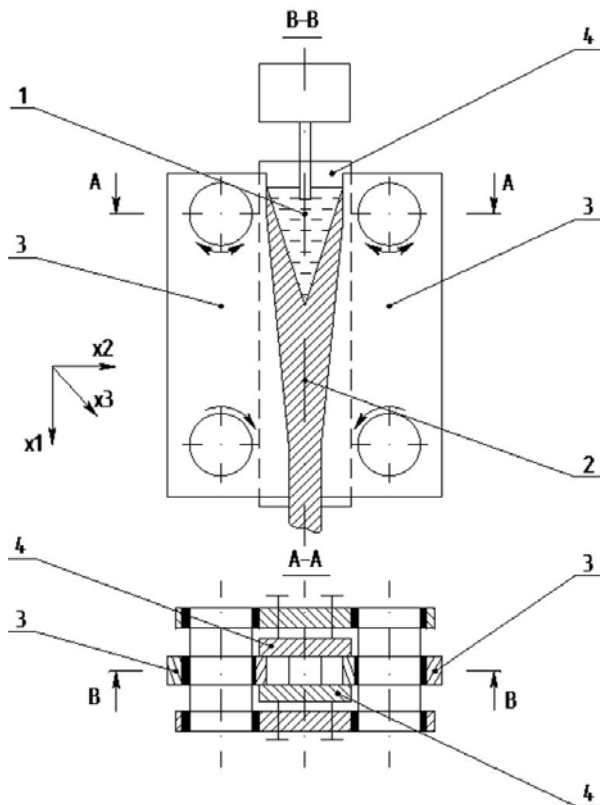


Рис. 1. Принципиальная схема устройства: 1 – металл в жидком состоянии; 2 – металл в твердом состоянии; 3 – наклонный боек (стенка кристаллизатора); 4 – боковые стенки

Кристаллизатор имеет четыре охлаждаемые стенки – два бойка 3 и две боковые плиты 4 (см. рис. 1), причем кристаллизатор может охлаждаться как с помощью всех четырех стенок 3 и 4, так и с помощью двух (бойков 3). В свою очередь, бойки имеют два варианта охлаждения: с помощью одного канала прямоугольного поперечного сечения с размерами  $20 \times 5$  мм (см. рис. 2) и двух каналов с размерами поперечного сечения  $5 \times 5$  мм (см. рис. 3).

Рассмотрим влияние указанных характеристик на распределение температурных полей в центральной части заготовки (плоскость симметрии  $x_1x_3$ ), в середине рассматриваемой области и вблизи поверхности бойка. Если все стенки кристаллизатора, имеющего линейный размер в верхней части 40 мм и в калибрующей части 15 мм, будут охлаждаемыми, то график температурного поля в виде изолиний будет иметь вид рис. 4. Из графика видно, что после заливки в кристаллизатор расплавленного металла распределение температур по плоскости сечения неравномерно, градиент температур составляет  $1000^\circ\text{C}$  по высоте кристаллизатора (см. рис. 4, а). Для сечений, в середине рассматриваемой области (см. рис. 4, б) и вблизи поверхности бойка (см. рис. 4, в), градиент температур составляет  $900^\circ\text{C}$  при максимальном и минимальном значениях температуры –  $1500^\circ\text{C}$  и  $600^\circ\text{C}$  соответственно. Можно отметить наиболее плавный характер изолиний температур по высоте и ширине рассматриваемой области вблизи поверхности бойка (см. рис. 4, в).

На рис. 5 схематично представлена конфигурация жидкой фазы в закристаллизовавшемся металле в конце цикла обжатия заготовки. На рисунке жидкая фаза имеет форму изолированной по боковой поверхности лунки, глубина проникновения жидкой фазы не больше 0,35 высоты кристаллизатора. Толщины корочек затвердевшего металла на внутренней поверхности в верхней части кристаллизатора составляют 0,15 – 0,2 толщины заготовки. Такая конфигурация и соотношение количества жидкой и твердой фаз значительно повышают усилия, которые необходимы для деформации заготовки в конце цикла ее обжатия, а следовательно, приводят к дополнительной нагрузке на приводные валы ЛКМВ.

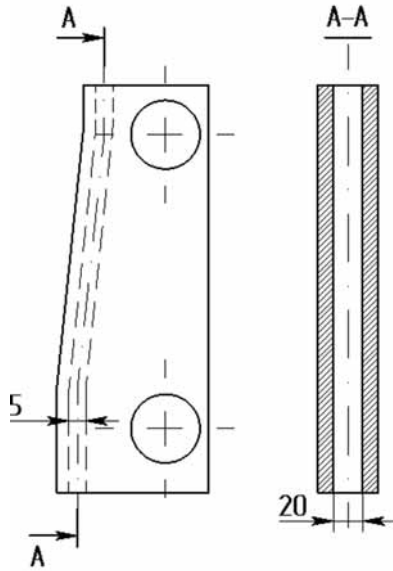


Рис. 2. Боек с одним каналом охлаждения прямоугольного сечения с размерами  $20 \times 5$  мм

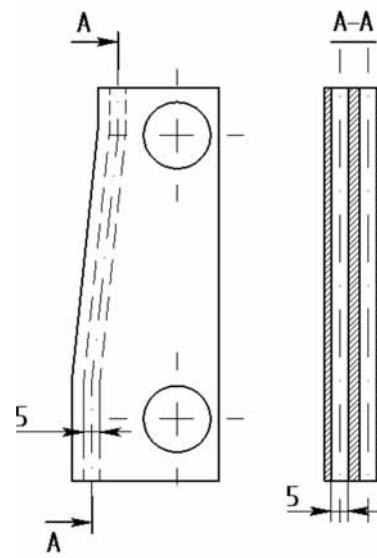


Рис. 3. Боек с двумя каналами охлаждения с размерами сечения  $5 \times 5$  мм

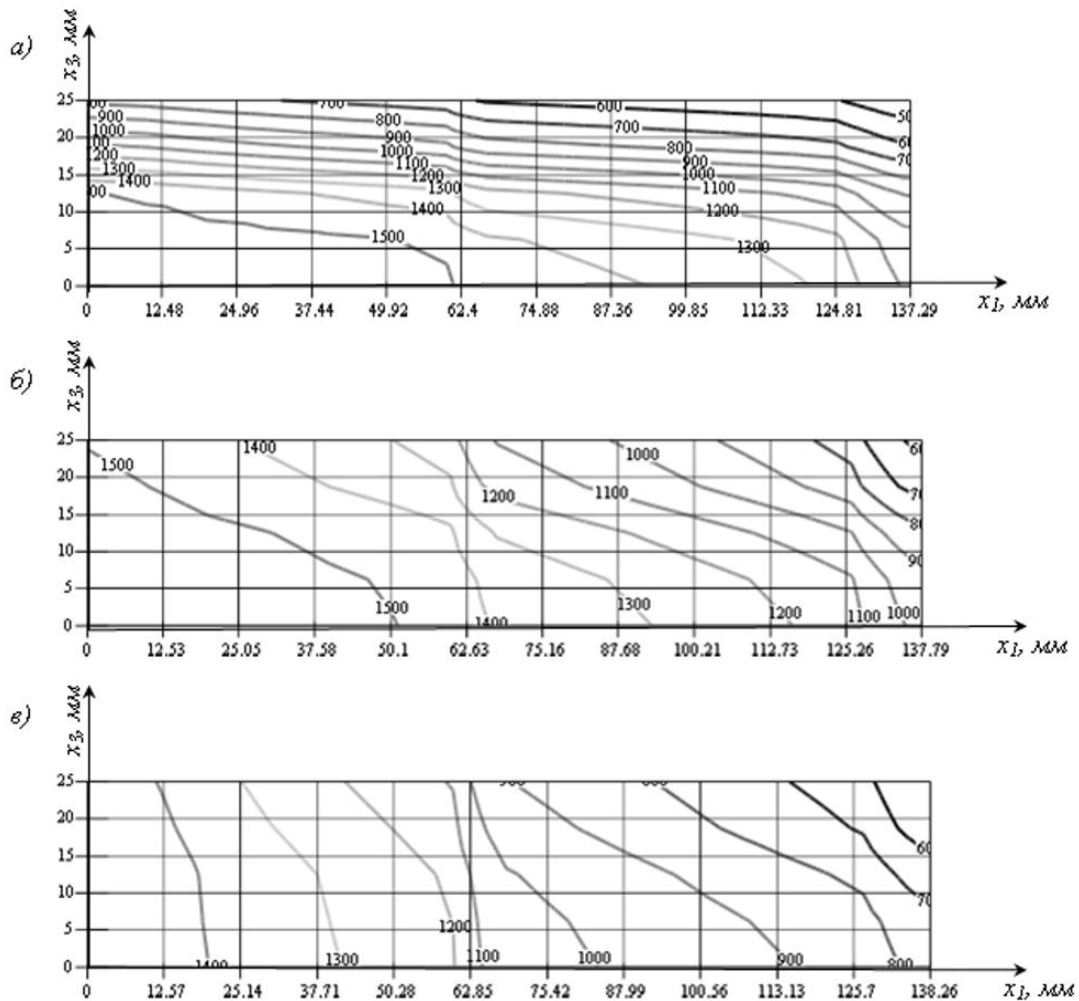


Рис. 4. Распределение значений температурных полей ( $^{\circ}\text{C}$ ) кристаллизатора ЛКМВ, охлаждаемого с помощью всех стенок, в сечении: а – по плоскости симметрии  $x_1x_3$ ; б – в середине рассматриваемой области; в – вблизи поверхности бойка

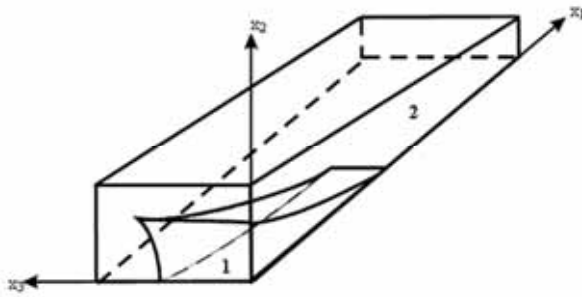


Рис. 5. Конфигурация жидкой фазы (1) в закристаллизовавшемся металле (2)

Графики температурных полей при втором варианте охлаждения кристаллизатора (охлаждаются только бойки) представлены на рис. 6. В этом случае температурные поля заготовки существенно отличаются от распределения температур, характерных для первого варианта охлаждения кристаллизатора ЛКМ. Температурные поля различных сечений рассматриваемой области характеризуются величинами градиентов температур. Распределение температур по плоскости симметрии неравномерно, максимальный градиент температуры

составляет  $500^{\circ}\text{C}$  по высоте кристаллизатора (см. рис. 6, а). Для сечений в середине рассматриваемой области (см. рис. 6, б) градиент температур составляет  $600^{\circ}\text{C}$  при максимальном и минимальном значениях температуры –  $1500^{\circ}\text{C}$  и  $900^{\circ}\text{C}$  соответственно. Вблизи поверхности бойка (см. рис. 6, в) градиент температур составляет  $800^{\circ}\text{C}$  при максимальном и минимальном значениях температуры –  $1400^{\circ}\text{C}$  и  $600^{\circ}\text{C}$ .

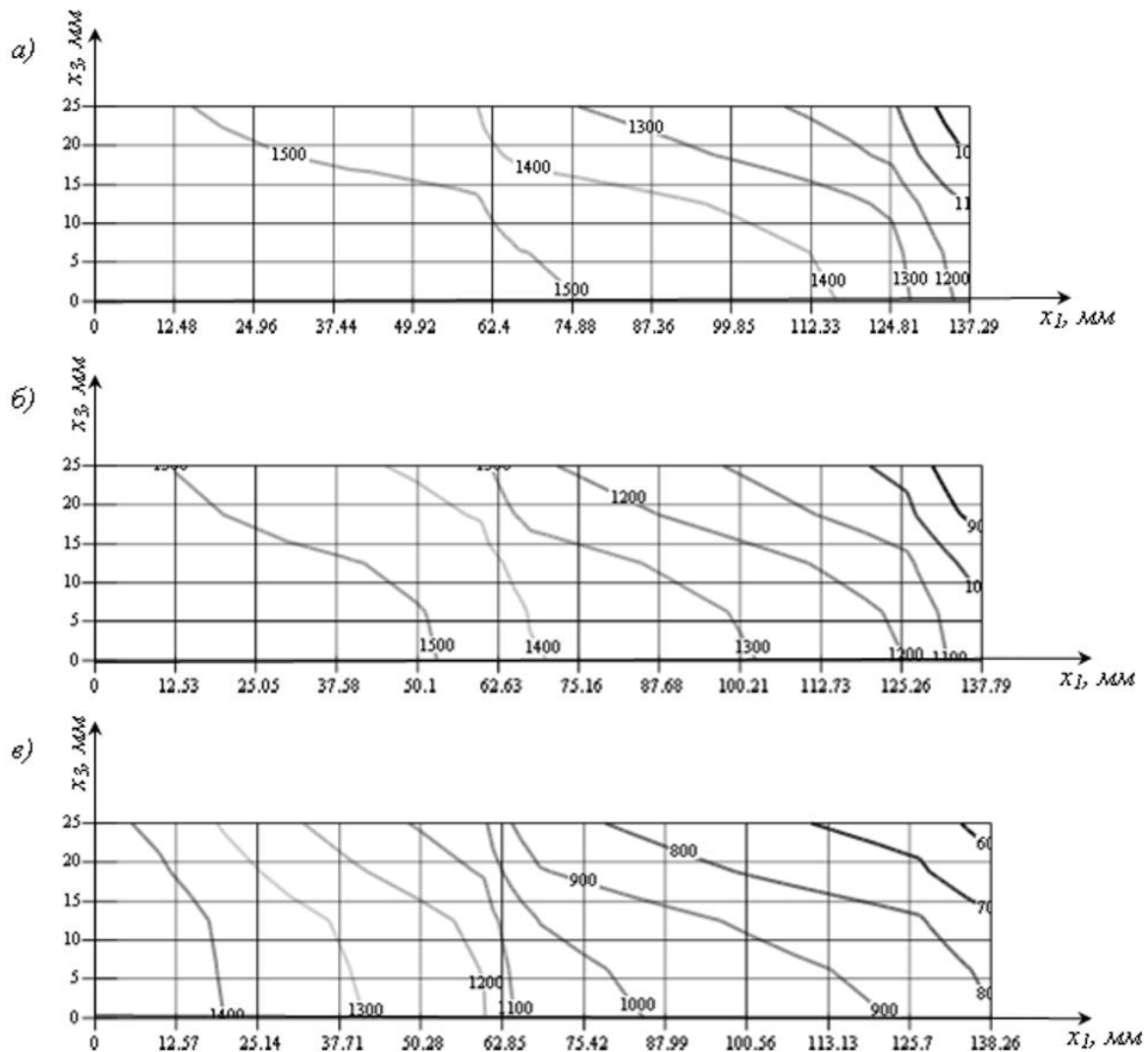


Рис. 6. Распределение значений температурных полей ( $^{\circ}\text{C}$ ) кристаллизатора ЛКМВ, охлаждаемого только бойками, в сечении: а – по плоскости симметрии  $x_1x_3$ ; б – в середине рассматриваемой области; в – вблизи поверхности бойка.

На рис. 7 схематично представлена конфигурация жидкой фазы в закристаллизовавшемся металле в конце цикла обжатия заготовки. На рисунке видно, что жидкая фаза имеет форму изолированной по двум боковым поверхностям лунки. Глубина проникновения жидкой фазы не превышает 0,45 высоты кристаллизатора. Отсутствуют корочки затвердевшего металла на внутренней поверхности стенок в верхней части кристаллизатора. На поверхности бойков образуются корочки, но их толщина незначительна и не превышает 0,1 от толщины заготовки. При такой конфигурации и соотношении количества жидкой и твердой фаз усилия, которые необходимы для деформации заготовки в конце цикла ее обжатия, значительно меньше, чем при первом варианте охлаждения кристаллизатора ЛКМВ, поэтому с технологической точки зрения наиболее приемлемым вариантом охлаждения кристаллизатора является второй вариант.

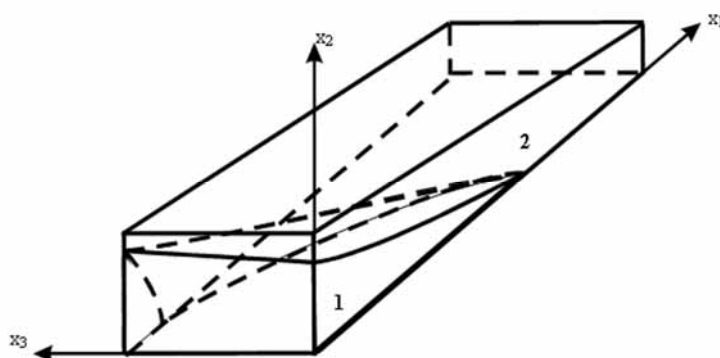


Рис. 7. Конфигурация жидкой фазы (1)  
в закристаллизовавшемся металле (2)

Для оценки влияния способа охлаждения бойков на температурный режим процесс охлаждения осуществлялся с помощью канала прямоугольного поперечного сечения с размерами  $20 \times 5$  мм (ранее боек охлаждался двумя каналами с размерами поперечного сечения  $5 \times 5$  мм). При аналогичном размере кристаллизатора наблюдается следующая картина (см. рис. 8).

Распределение температур по плоскости симметрии в направлении ширины бойка. Максимальный градиент температуры составляет  $400$  °С по высоте кристаллизатора (см. рис. 8, а). Глубина проникновения жидкой фазы в центре заготовки увеличивается и составляет 200 мм. Корочки в верхней плоскости кристаллизатора не образуются. Для сечения в середине рассматриваемой области (см. рис. 8, б) максимальный градиент температуры составляет  $500$  °С по высоте кристаллизатора. Глубина проникновения жидкой фазы в центре заготовки увеличивается и составляет 82 мм. В этом сечении корочки в верхней плоскости кристаллизатора также не образуются. Для сечения вблизи поверхности бойка (см. рис. 8, в) градиент температур составляет  $600$  °С при максимальном и минимальном значениях температуры –  $1500$  °С и  $900$  °С соответственно. Глубина проникновения жидкой фазы в центре заготовки составляет 10 мм. Толщина образовавшейся в этом сечении корочки в верхней плоскости кристаллизатора – 8 мм.

Из анализа полученных расчетных данных можно сделать вывод, что способ охлаждения бойков влияет на температурный режим получаемой заготовки. Сравнивая значения температурных полей при условии наличия двойного канала охлаждения в бойке и одинарного канала охлаждения, можно отметить, что при двойном канале охлаждения равномерность распределения температур по высоте и толщине заготовки меньше, чем при одинарном канале охлаждения. Об этом свидетельствует более высокий градиент температур для всех рассматриваемых сечений. При этом глубина проникновения жидкой фазы по высоте заготовки больше, чем при двойном канале охлаждения.

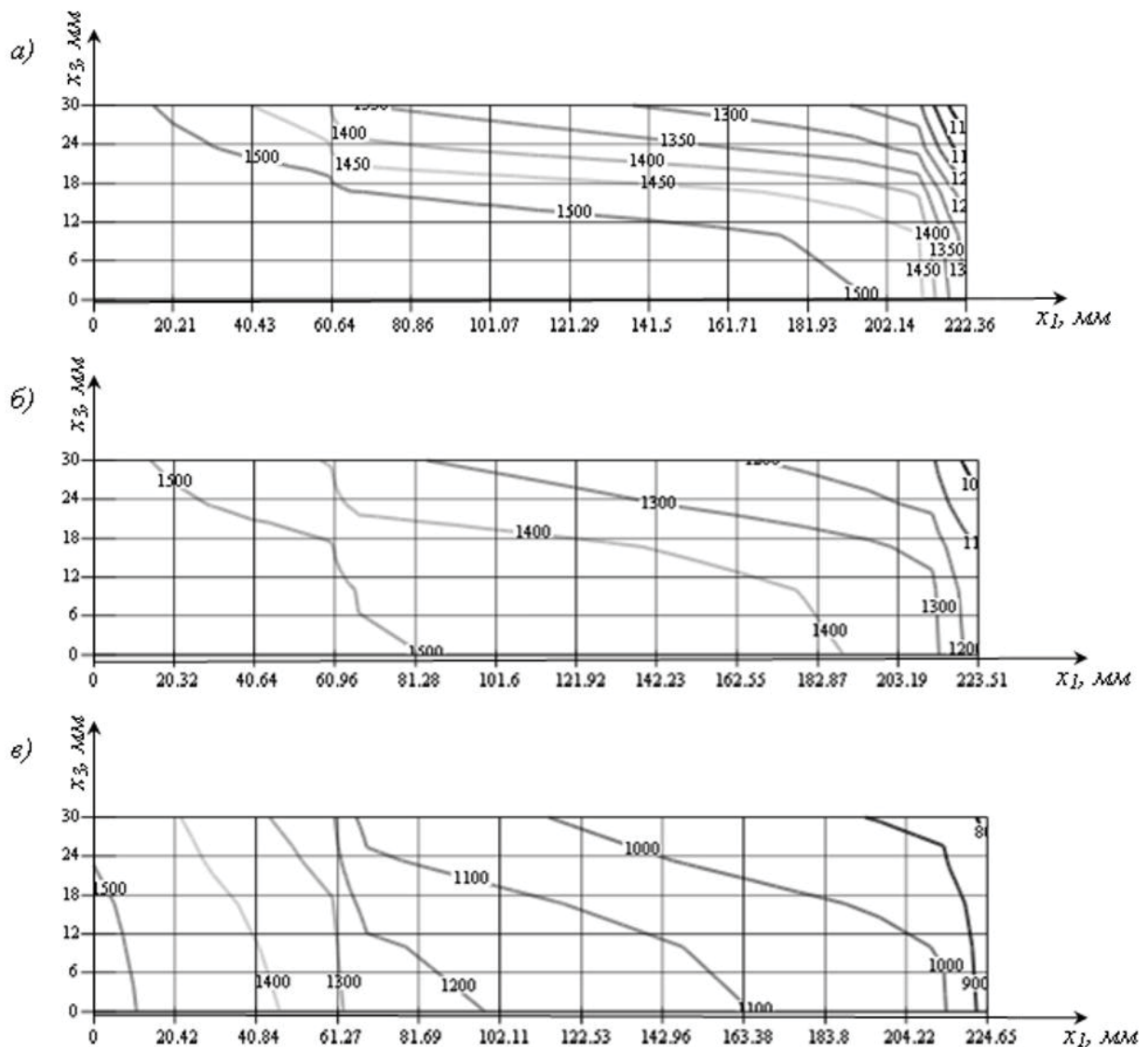


Рис. 8. Распределение значений температурных полей ( $^{\circ}\text{C}$ ) кристаллизатора ЛКМВ в сечении при использовании двойного канала охлаждения бойка: а – по плоскости симметрии  $x_1x_3$ ; б – в середине рассматриваемой области; в – вблизи поверхности бойка

Для обобщенного анализа всех полученных расчетных данных по температурным полям заготовки в зависимости от способов охлаждения кристаллизатора и бойка был введен

**Черномас В. В., Саликов С. Р.**

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

технологический критерий оценки, который позволяет определить технологически приемлемые границы его варьирования. В качестве такого критерия был принят показатель, характеризующий глубину (высоту) проникновения жидкой фазы в плоскости симметрии  $x_1x_3$  в конце цикла обжатия заготовки. Границы варьирования глубиной проникновения жидкой фазы определяли из условий, характеризующих безаварийность работы ЛКМ. С одной стороны, исключали возможность проникновения жидкой фазы в калибрующую часть кристаллизатора ЛКМ, чем предотвращали возможность прорыва жидкой фазы вне зоны кристаллизатора ЛКМ. С другой стороны, обеспечивали минимальную нагрузку на привод подвижных частей кристаллизатора ЛКМ за счет уменьшения количества деформируемой твердой фазы в верхней части кристаллизатора. Окончательно это условие записывали как:

$$\frac{1}{4}l \leq l_L \leq \frac{4}{5}l, \quad (1)$$

где  $l_L$  – глубина проникновения жидкой фазы по высоте заготовки, мм;  $l$  – высота кристаллизатора, мм.

Используя условие (1), анализировали полученные расчетные данные температурных полей заготовки в зависимости от способов охлаждения кристаллизатора и бойка. Из анализа расчетных данных можно сделать следующие выводы. Охлаждение вертикальных стенок кристаллизатора недопустимо (см. рис. 4), поскольку полученные данные не удовлетворяют условию (1). Все данные, полученные для второго варианта охлаждения кристаллизатора, удовлетворяют условию (1) и являются технологически приемлемыми (см. рис. 6 и рис. 8).

### **Заключение**

Таким образом, полученный критерий глубины проникновения жидкой фазы, включающий в себя многие параметры работы ЛКМВ, является технологическим критерием получения качественных металлоизделий на установке непрерывного литья и деформации металла и позволяет осуществлять процесс безаварийной работы установки с оптимальными нагрузками на ее узлы.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Теоретическое и экспериментальное исследование непрерывного процесса кристаллизации металла при одновременном его деформировании / В. И. Одинокоев, Б. И. Проскуряков, В. В. Черномас. – М.: Наука, 2006. – 111 с.

**Салина М. В.**  
**M.V.Salina**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. ЛИТЬЕ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ**

### **USE OF CRYOTECHNOLOGY IN FOUNDRY. ICE-MOULD FREEZE CASTING**



**Салина Марина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [salmav@mail.ru](mailto:salmav@mail.ru).

**Ms.Marina V. Salina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of "Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur city), E-mail: [salmav@mail.ru](mailto:salmav@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приведен обзор новой разрабатываемой в институте ФТИМС НАНУ технологии изготовления отливок по ледяным моделям. Цель предложенной криотехнологии – экономия материальных и энергоресурсов, а также повышение экологической безопасности литейного производства. В данной статье приводится описание способов получения ледяных моделей и оболочковых форм, а также разработанных модельных составов.

**Summary.** The paper offers a review of the new ice-mould freeze casting technology developed by the Institute of Physics and Technology of Metals and Metal Alloys of the Ukrainian National Academy of Sciences. The goal of the proposed technology is to reduce material cost and save energy, and also to improve environmental safety of foundry industry. The paper describes different methods to make ice-moulds and shell moulds, and also various lost waxes.

**Ключевые слова:** криотехнология, экологичность, ресурсосбережения, ледяная модель, связующее, оболочковая форма, компонент, водная композиция, газифицируемая модель, пенополистирол.

**Key words:** cryotechnology, environmental safety, cost-effective use of resources, ice-mould, binder, shell mould, component, water-based compound, lost pattern, polystyrene.

УДК 621.74.045

Модель играет важную роль при изготовлении литейных форм в литейном производстве. От качества поверхности модели, ее размерной точности, материала и способа удаления зависит и качество получаемых отливок. Наряду с требованиями к качеству возрастают требования к экологичности и материалосбережениям при получении модели.

Литье в песчаные формы остается основным технологическим процессом получения отливок, который охватывает свыше 75 % их выпуска (в России свыше 77 %). Среди конкурирующих технологий наиболее перспективным, с точки зрения экологии, является литье в песчаные вакуумируемые формы. Кроме того, тенденция увеличения количества литейных цехов и участков литья по выплавляемым (ЛВМ, investment casting/lost wax process) и газифицируемым (ЛГМ, lost foam casting) моделям подтверждает спрос промышленности прежде всего на точные виды литья.

В последние годы все шире в литейных цехах используется технология ЛГМ, по которой в песчаной форме модель из пенопласта при заливке замещается расплавленным металлом и таким образом получают высокоточную отливку. Мировая практика свидетельствует о постоянном росте производства отливок этим способом, которое превысило 1,5 млн. т/год, особенно популярно оно в США и Китае (в одном КНР работает более 1,5 тыс. таких участков), где все больше получают отливок без ограничений по форме и размерам. На 1 т годного литья расходуется четыре вида модельно-формовочных (неметаллических) материалов: кварцевого песка – 50 кг, противопопригарного покрытия – 25 кг, пенополистирола – 6 кг,

**Салина М.В.**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. ЛИТЬЕ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ**

пленки полиэтиленовой – 10 м<sup>2</sup>. Отсутствие традиционных форм и стержней исключает применение формовочных и стержневых смесей, формовка состоит из засыпки модели песком.



Рис. 1. Модель, полученная из водной композиции

Разработчиком и поставщиком оборудования литья по пенопластовым моделям является институт ФТИМС НАНУ (г. Киев, Украина), который поставил оборудование и запустил ряд участков ЛГМ в России, Польше и Вьетнаме. Из последних объектов 2006 г. – запущен литейный цех на 5000 т/год в Днепропетровске. В литейном производстве России и Украины все больше создается таких цехов. Оборудование для ЛГМ, которое поставляется вместе с чертежами ФТИМС, недорогое и простое в эксплуатации при литье черных и цветных металлов с массой отливки от 0,1 до 2500 кг. Литейный цех ФТИМС (г. Киев) опытного производства изготавливает такие отливки из чугуна, стали, алюминия, медных сплавов до 50 т в месяц (см. прим. 1).

Развитие ледяных технологий – это еще один шаг в завтрашний день литейного производства с новым уровнем экологической культуры. Еще в 1923 г. польский геофизик А. Б. Добровольский в своей монографии "Естественная история льда" отрасль науки о льде во всех его видах и проявлениях предложил называть криологией. Термин «криотехнология» пока распространен лишь среди медиков и создателей холодильной техники, а лед как материал для изготовления промышленных конструкций еще не нашел широкого применения.

Параллельно с совершенствованием технологии литья по газифицируемым моделям из пенополистирола в институте ФТИМС НАНУ под руководством профессора О.И. Шинского разрабатывается способ получения отливок по одноразовым моделям из льда как конструктивного или матричного материала с незначительными добавками или примесями. Технология изготовления отливок этим способом предусматривает использование такой же модельной и формовочной оснастки, что и при ЛГМ.



Рис. 2. Оболочковые формы, полученные по ледяным моделям

Привлечение криотехнологии в литейное производство, прежде всего, связано с заменой органических материалов для изготовления одноразовых литейных моделей или с заменой связующих для песчаных литейных форм на лед в целях ресурсосбережения и повышения экологической безопасности производства. Так как форма состоит из сухого песка и модели из льда, то исключается горение связующих материалов в песчаной смеси при заливке металлом формы, а также газовыделения в цех. Исключен вывоз в отвал спеченных песчаных отходов (обычно до 4 т смеси на 1 т полученных отливок), который присутствует в традиционных технологиях литья в песчаную форму. Разрабатываемая институтом ФТИМС НАНУ криотехнология защищена десятками патентов на изобретения [2] (см. прим.2).

Разработчиками предложены три способа изготовления оболочковых форм с использованием связующих либо холоднотвердеющих композиций. В первом – модель служит носителем связующего материала, а облицовочная или единая песчаная смесь может содержать отвердитель. Во втором – модель является носителем отвердителя, а песок – связующего. В третьем – модель состоит из чистой воды (наиболее экологически благоприятный вариант) (см. рис. 1). Оболочковая форма изготавливается путем засыпки песка в контейнер с ледяной моделью и виброуплотнения. После того, как модель растает и пропитает песок, образуется песчаная корка толщиной 3...8 мм. При получении оболочки в ее состав достаточно вводить 0,3...0,4 % связующего от массы песка в контейнере, что примерно на порядок меньше, чем вводят в традиционных формах из холоднотвердеющих песчаных смесей (ХТС) со связующим.

Разработка составов замораживаемых водных композиций, в которых один компонент связующего находится в модели, а другой в окружающей ее песчаной смеси, показала достаточно хорошую технологичность получения оболочковых форм путем пропитки их водным составом от тающей модели. В одном из примеров использовали ледяные модели из водного раствора жидкого стекла плотностью  $1,08 \text{ г/см}^3$ , а в песчаной смеси – быстротвердеющего цемента. Продолжительность твердения оболочки от начала таяния модели массой 0,2...0,5 кг составляла от 6 мин и более, после полного расплавления модели остаток (не пропитавший окружающий песок) модельной композиции выливали из затвердевшей оболочки, а оболочковую форму направляли на подсушку или заливку металлом с небольшим вакуумированием (см. рис. 2).

Как показали практические исследования, наиболее технологичными для ледяных моделей являются разработанные составы водных композиций с водорастворимыми связующими и ПАВ, например, композиции с добавлением 10 % полимерного реагента таких видов:

**Салина М.В.**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. ЛИТЬЕ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ**

крахмалита (ЭКР по ТУ 18-8-14-80); КМЦ; дисперсии ПВА; раствора жидкого стекла плотностью 1,08...1,09 г/см<sup>3</sup>. Эти гелеобразователи путем пропитки создают зону пониженной газопроницаемости поверхностных слоев песчаной формы, герметизируют и приближают ее свойства до вакуумно-пленочной формы, а при затвердевании связующего создают оболочковую форму.



Рис. 3. Пресс-формы для получения ледяных моделей

Способы получения оболочковых форм с герметизирующими и противопригарными свойствами позволили отработать технологию образования стабильно устойчивой песчаной поверхности рабочей полости формы. Эта технология основана на многократном использовании сыпучих материалов: кварцевого песка или песчаной смеси, которые пропитываются талой жидкой композицией модели. Избыток этой композиции выливается или откачивается из полости формы (с возможностью повторного использования), и получают достаточной прочности формы для заливки металлом. Литьем в такие оболочковые формы были получе-



ны из черных и цветных металлов отливки шестерен и полумуфт, как формовкой одной ледяной модели со стояком, так и блока из двух и более моделей (см. прим. 2, 3). Также разработаны оригинальные способы нанесения на ледяные модели синтетической пленки с последующим использованием технологии вакуумно-пленочной формовки.

В ходе создания научных основ криотехнологии модельного и формовочного производства были проведены исследования тепло- и массообменных процессов при изготовлении одноразовых ледяных моделей, а также их таяния при получении песчаной литейной формы. Физико-аналитическое моделирование тепловых процессов, возникающих при замораживании моделей, позволило получить математическую зависимость температуры охлаждения пресс-формы от требуемой толщины твердого поверхностного слоя модели и создать технологию изготовления модели заливкой водной композиции в пресс-форму без ее специальной герметизации (см. рис. 3). Определены закономерности роста кристаллов льда при замерзании модели и роста дендритных структур, что дало возможность практического подхода к измерению площади фронта кристаллизации ледяной литейной модели. В результате исследования деструкции ледяной модели методом гравиметрии литейной формы определена зависимость изменения массы образца ледяной модели от времени ее таяния. На основании исследований гидродинамики при проникновении жидкого продукта деструкции одноразовой ледяной модели в толщу песка вакуумированной формы под действием градиентов газового давления и концентрации модельного материала разработан способ изготовления оболочковых форм путем пропитки связующим, в котором модель служит носителем этого связующего (см. прим. 4, 5).

Применение криотехнологии для литья по одноразовым ледяным моделям деталей из металлов для машиностроения исключает или минимизирует использование полимеров или связующего для песка в литейной форме, заменяет органические (пенопластовые или парафино-стеариновые выплавляемые) модели на ледяные, а такой процесс производства отливок полностью соответствует экологически чистым безотходным технологиям.

Криотехнология в литейном производстве позволяет получать отливки из чугуна, стали, алюминия, медных и других сплавов. Такой процесс производства отливок полностью соответствует экологически чистым безотходным технологиям по принципу «*просто добавь воды*» (см. прим. 2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилин, И. В. Литье по ледяным моделям / И. В. Гаврилин // Литейное производство. – 1994. – № 9. – С. 14-15.
2. Пат. 80381 Украина МПК В22С 9/02, В22С 7/00. Способ изготовления отливок / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАНУ (г. Киев, Украина). – Оpubл. 2007, Бюл. № 14.
3. Шинский, О. И. Особенности передачи тепла в пористых охлажденных формообразующих материалах / О. И. Шинский, И. В. Ткачук, И. Б. Васильев // Процессы литья. – 1997. – № 4. – С. 58-63.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. Оптимальная технология для отечественного литейного производства. Литье по пеномоделям. – Режим доступа: <http://www.biznet.ru/topic31376.html>.
2. От литья металлов по одноразовым моделям из пенопласта к литью по ледяным моделям (просто добавь воды). – Режим доступа: [http://forum.i-mash.ru/topic\\_158](http://forum.i-mash.ru/topic_158).
3. Дорошенко, В. С. Производство отливок из металла по ледяным моделям / В. С. Дорошенко. – Режим доступа: <file://localhost/mht>.
4. Дорошенко, В. С. Эко-крио-технология литья металлов по ледяным моделям (просто добавь воды) / В. С. Дорошенко. – Режим доступа: <http://ecofriendly.ru/eco-krio-tekhnologija-litja-metallov-po-ledyanym-modelyam-prosto-dobav-vody>.
5. Цикл по технологии литья металлов (производство отливок) по ледяным моделям. – Режим доступа: <http://www.eco-time.com.ua/publications-31.html>.

**Муравьев В.И., Фролов А.В., Дмитриев Э.А., Башков О.В., Тарасов Е.А.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Муравьев В. И., Фролов А. В., Дмитриев Э. А., Башков О. В., Тарасов Е. А.**  
**V.I.Muravyev, A.V.Frolov, E.A.Dmitriev, O.V.Bashkov, E.A.Tarasov**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**DEFINING THE PHASE PRETRANSFORMATION EFFICIENCY AT MANUFACTURE OF STEEL/ALLOY MATERIAL STRUCTURES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD**

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@Mail.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: VMuravyev@Mail.ru.

**Фролов Алексей Валерьевич** – кандидат технических наук, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Mr. Alexsey V. Frolov** – PhD in engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Innov@Knastu.ru.

**Mr. Eduard A. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Provost for Innovation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Innov@Knastu.ru.

**Башков Олег Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и технологии новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Kmtnm@Knastu.ru.

**Mr. Oleg V. Bashkov** - PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Kmtnm@Knastu.ru.

**Тарасов Евгений Александрович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Mr. Evgeniy A. Tarasov** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Аннотация.** Показаны возможности повышения эксплуатационных характеристик металлических изделий и эффективности технологических операций их изготовления за счёт более полного использования эффектов фазовых превращений. Представлены результаты исследований возможности использования акустико-эмиссионного метода для определения границ фазовых переходов в конструкционных сталях и сплавах.

**Summary.** There are possibilities to improve metal item performance by a more complete usage of the phase pretransformation effects. The paper demonstrates the results of a research of applying the acoustic emission method to the determination of phase transformation borders in construction steel and alloy materials.

**Ключевые слова:** термическая обработка, фазовые превращения, акустическая эмиссия, марки сталей 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА, марка сплава ВТ-20.

**Key words** heat treatment, phase pretransformations, acoustic emission, steel 3, 5, 20, 45, chromansil, VT-20.

УДК 621.78



## Введение

Как известно, значительное количество современных технологических операций изготовления металлических конструкций базируется на использовании фазовых превращений в сплавах (различные виды термической и термомеханической обработок, горячая обработка давлением, ковка и др.). Характерно, что традиционные режимы указанных технологических операций предусматривают полный перевод материала в требуемое фазовое состояние (аустенизация при закалке, горячей штамповке, прокатке и т.д.). Но в последнее время внимание исследователей и практиков всё чаще акцентируется на использовании эффектов предпревращения, то есть эффектов, происходящих на границах фазовых превращений без изменения структуры материала.

Одним из первых обнаруженных эффектов фазовых предпревращений можно считать эффект субкритической сверхпластичности [1]. Указанный эффект заключается в резком повышении пластических свойств сплава при температурах, близких к температурам фазовых превращений. Использование этого эффекта при штамповке титановых сплавов позволило повысить пластичность более чем в семь раз. Важно, что после штамповки в условиях субкритической сверхпластичности повышаются как прочностные, так и пластические механические свойства заготовки: прочность – до 10 %, пластичность – до 60 %, малоцикловая усталость – до 20 % [2].

Изотермическая закалка с выдержкой в интервале бейнитного предпревращения быстрорежущих сталей [3] обеспечивает комплексное повышение их эксплуатационных свойств, что обуславливает увеличение ресурса режущего инструмента более чем на 60 %. Аналогичные эффекты комплексного повышения эксплуатационных характеристик наблюдаются и при изотермической закалке в интервале бейнитного предпревращения стали марки 30ХГСА [4].

Эффект аустенитного предпревращения при повторной закалке [5] приводит к измельчению зерна и к комплексному повышению как прочностных, так и пластических характеристик стали 30ХГСА по сравнению с традиционной технологией её термического улучшения. Кроме того, длительность выдержки в интервале аустенитного предпревращения позволяет управлять свойствами стали в широком интервале – от свойств, характерных для отпущенного материала, до свойств закалённой стали.

Указанные эффекты связаны с ослаблением межатомных связей вблизи границы фазовых переходов. Это создаёт условия для выравнивания внутренней дефектной наноструктуры материала, устранения локальных зон с повышенной степенью плотности дислокаций, то есть устранению наклёпа, «залечиванию» трещин и т.д. Поэтому степень проявления описанных эффектов зависит от условий их термической обработки: чем ближе температурно-временные условия их изотермической выдержки к точке фазового превращения, тем в большей степени проявляются эффекты фазовых предпревращений. В то же время переход за границу фазового превращения резко уменьшает указанные эффекты.

Таким образом, эффекты фазовых предпревращений обладают значительным неиспользованным запасом потенциальных возможностей повышения эффективности технологических операций для изготовления металлических конструкций. Повышение эффективности использования фазовых предпревращений возможно за счёт максимального приближения условий изотермической выдержки сплава к границе фазового превращения, исключая само превращение. Границы фазовых переходов определяются химическим составом сплава, при этом изменение состава сплава в пределах допусков стандарта приводит к изменению положения границы фазового превращения более чем на 5 – 10 %. На положение критических точек фазовых превращений также оказывают влияние скорости нагрева и охлаждения, температура нагрева под закалку и другие факторы. Поэтому ключевым моментом решения задачи обеспечения оптимальных условий изотермической выдержки является точное определение граничных условий фазовых превращений. В идеальном варианте необходимо создать авто-

материя, которую система управления термическим циклом и контроля структуры материала непосредственно обрабатываемой детали в процессе её термической обработки.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество методов определения структуры материала и границ его фазовых превращений. Но для поставленной задачи ни один из широко применяемых методов не подходит. Микроструктурный и дюрOMETрические методы отличаются большой трудоёмкостью, медленной скоростью и не позволяют проводить исследования в реальном времени. Магнитометрический метод не применим при температурах выше точки Кюри, а аустенитное и некоторые виды перлитного превращения протекают выше этой точки. Широко распространённый дилатометрический метод не позволяет проводить исследования на высоких скоростях нагрева и охлаждения и не позволяет исследовать процессы в непосредственно обрабатываемых деталях. В связи с этим вызывает интерес метод исследований, основанный на анализе сигналов акустической эмиссии (АЭ) [6].

Метод АЭ отличается низкой трудо- и ресурсоёмкостью, позволяет проводить исследования в реальном масштабе времени практически без ограничений по скоростям нагрева и охлаждения, а также по формам и размерам образцов. В связи с тем, что метод АЭ позволяет исследовать кинетику фазовых превращений непосредственно в обрабатываемой детали в реальном времени, он может быть эффективно использован для создания автоматической системы управления циклом термической обработки с обратной связью в виде сигналов акустической эмиссии.

В связи с вышеизложенным авторами статьи были проведены исследования влияния фазовых превращений в сталях марок 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА и сплаве марки ВТ-20 на параметры излучаемых АЭ сигналов с целью определения возможности использования метода АЭ для повышения эффективности использования фазовых превращений в технологических операциях изготовления металлических конструкций.

#### **Методика экспериментов**

Исследования проводились на пластинчатых образцах из сталей марок 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА, а также на титановом сплаве марки ВТ-20. Размеры образцов: 2 × 15 × 500 мм.

Исследуемые образцы помещались в лабораторную камерную печь SNOL-6,7/1300 на глубину 200 мм через асбестовые уплотнители шириной 40 мм. Нагрев образцов осуществлялся как вместе с нагревом печи (при исследовании скоростей нагрева менее 5 К/с), так и в предварительно разогретой до 1100 °С печи (при исследовании скоростей нагрева 50 К/с и выше).

Для исследования сигналов АЭ на холодном конце образцов размещался пьезоэлектрический приёмник акустической эмиссии GT-301. Для улучшения акустического контакта между поверхностями образца и датчика АЭ наносилась силиконовая смазка. Регистрируемые сигналы АЭ усиливались усилителем GT-200А, подвергались 12-битной аналого-цифровой обработке с частотой дискретизации 10 МГц и записывались на компьютер. После завершения эксперимента проводилась обработка полученной информации. Анализировались следующие параметры сигналов АЭ: амплитуда, длительность, энергия, мощность, спектр, а также активность АЭ.

Измерение температуры образца производилось зачеканенной в образец термопарой К-типа, сигнал с которой усиливался дифференциальным усилителем, подвергался 12-битной аналого-цифровой обработке, записывался на компьютер и синхронизировался по времени с сигналами АЭ.

Для определения критических точек фазовых переходов образцы подвергались дилатометрическому исследованию на дилатометре NETZCH DIL402PC со скоростью 10 К/мин. Полученные данные о положении критических точек фазовых превращений корректировались в соответствии с [7].

### Результаты экспериментов

Установлено, что в интервале перлитного превращения наблюдается повышение активности АЭ (см. рис. 1, 2). Важно, что вид диаграммы суммарного счёта (см. рис. 2) близок по форме к «классической» кинетической кривой превращения аустенита в перлит, что не только подтверждает связь процессов фазового превращения с регистрируемой АЭ, но и позволяет производить количественную оценку степени превращения аустенита в перлит по параметрам акустической эмиссии.

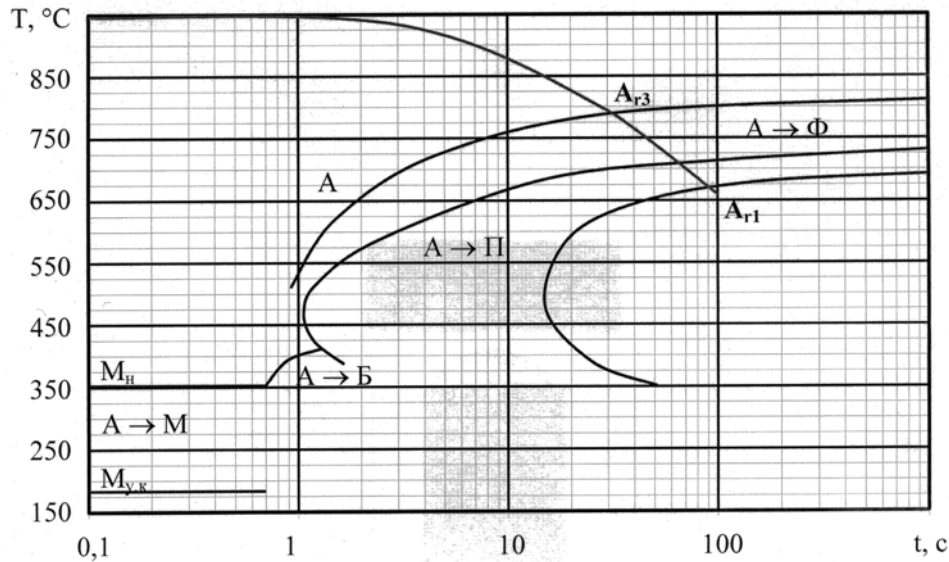


Рис. 1. Диаграмма охлаждения стали марки 5сп во время исследования влияния перлитного превращения на параметры АЭ сигналов

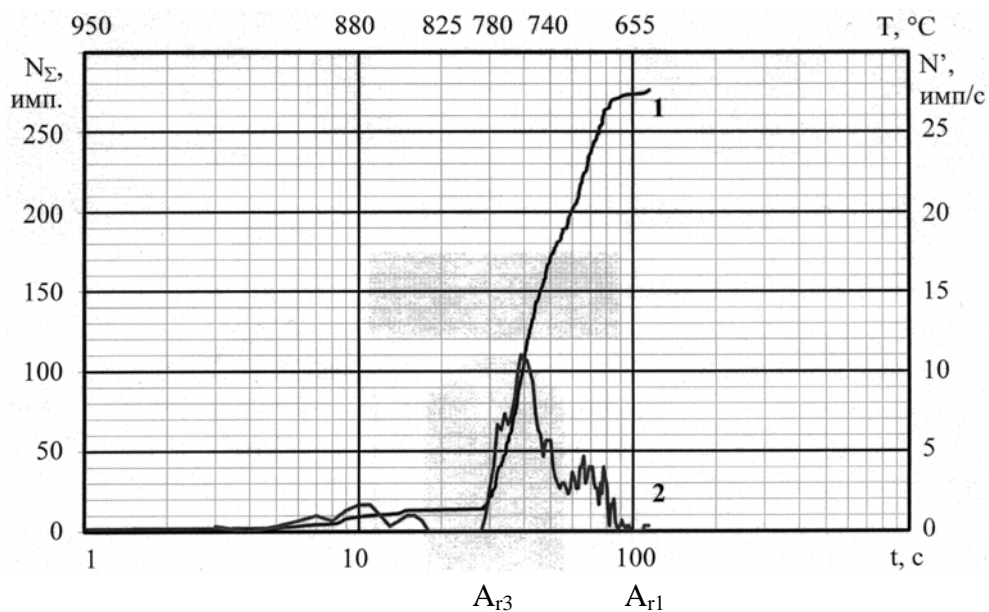


Рис. 2. Диаграммы суммарного счёта и активности АЭ во время исследования перлитного превращения в стали марки 5сп

Кроме изменения активности АЭ, завершение перлитного превращения также сопровождается изменением спектра сигналов АЭ (см. рис. 3) – в спектре практически полностью исчезают низкочастотные составляющие. Аналогичные зависимости обнаружены и для других исследованных сталей (см. рис. 4), и других скоростей охлаждения.

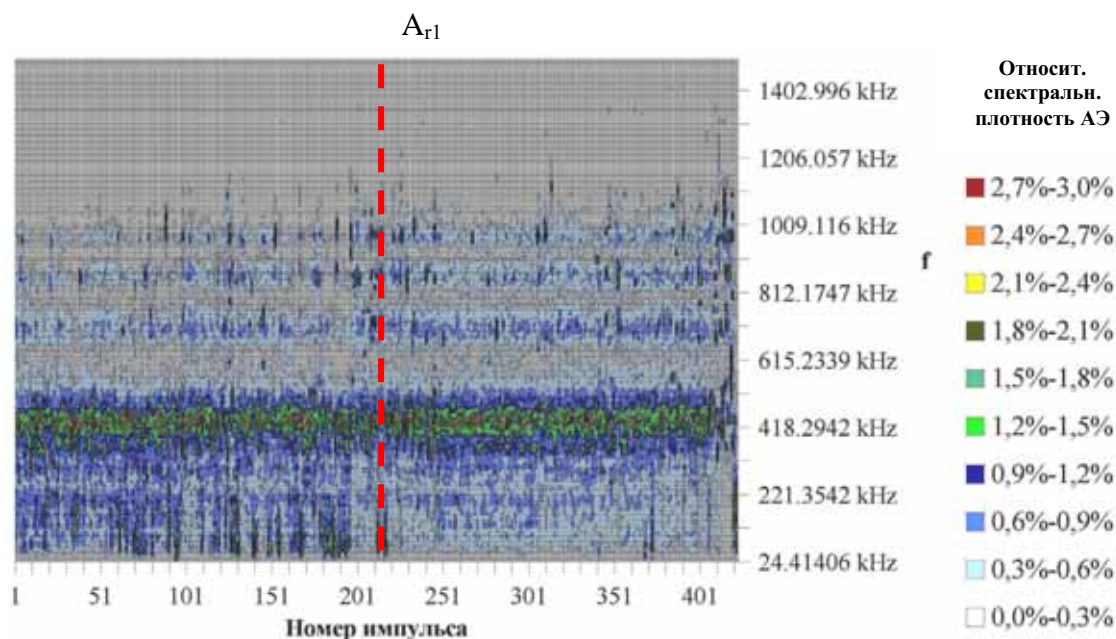


Рис. 3. Диаграмма относительной спектральной плотности АЭ сигналов во время исследования перлитного превращения в стали марки 5сп

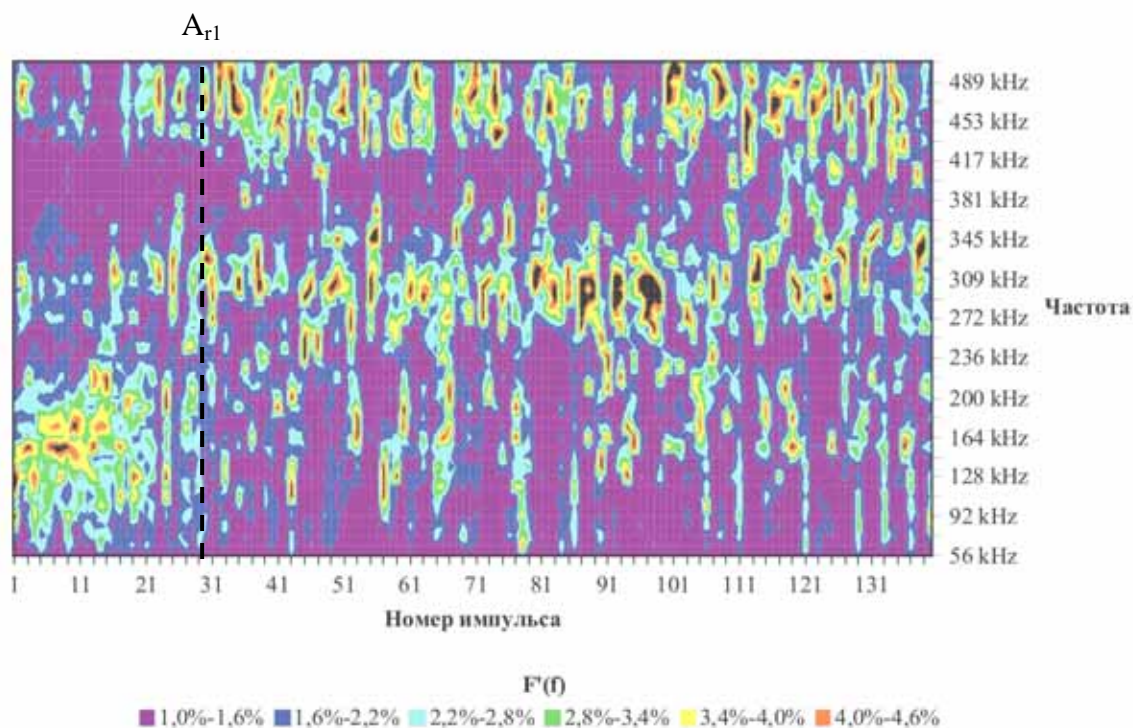


Рис. 4. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нормализации закалённой стали марки 20

Исследования аустенитного превращения (см. рис. 5 – 8) показали, что аустенитное превращение сопровождается смещением спектра АЭ в низкочастотную область. Однако на диаграмме относительной спектральной плотности процесс растворения карбидов не идентифицируется и точка  $A_{c3}$  не определяется. Относительно постоянные спектры сигналов АЭ до аустенитного превращения и после дают основание предполагать, что спектральная характеристика сигналов АЭ в значительной степени определяется типом кристаллической решётки. Важно, что на обнаруженный эффект скорость нагрева не влияет (исследованы скорости нагрева в диапазоне от 6 до 50 К/с).

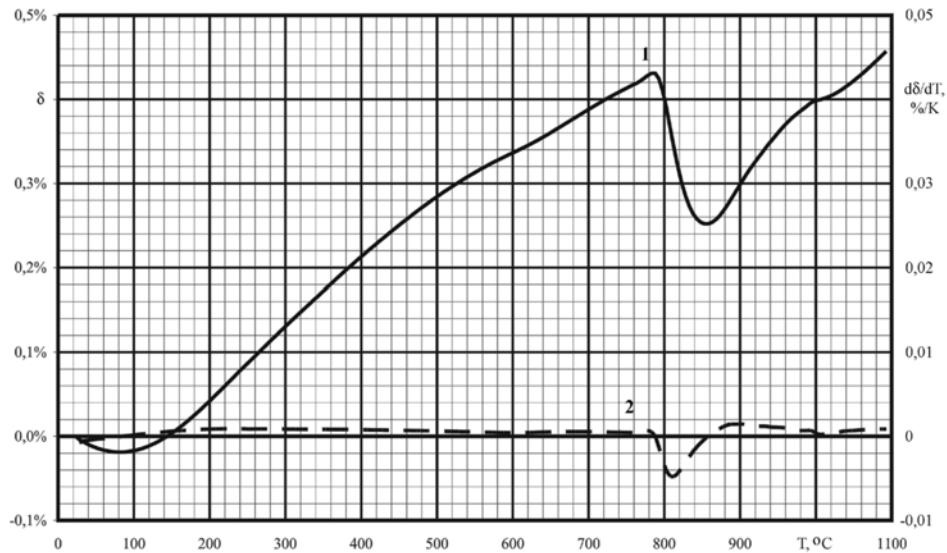


Рис. 5. Диаграммы относительного удлинения (1) и первой производной относительного удлинения (2) по температуре отожжённого образца из стали марки 30ХГСА во время его нагрева со скоростью 0,17 К/с

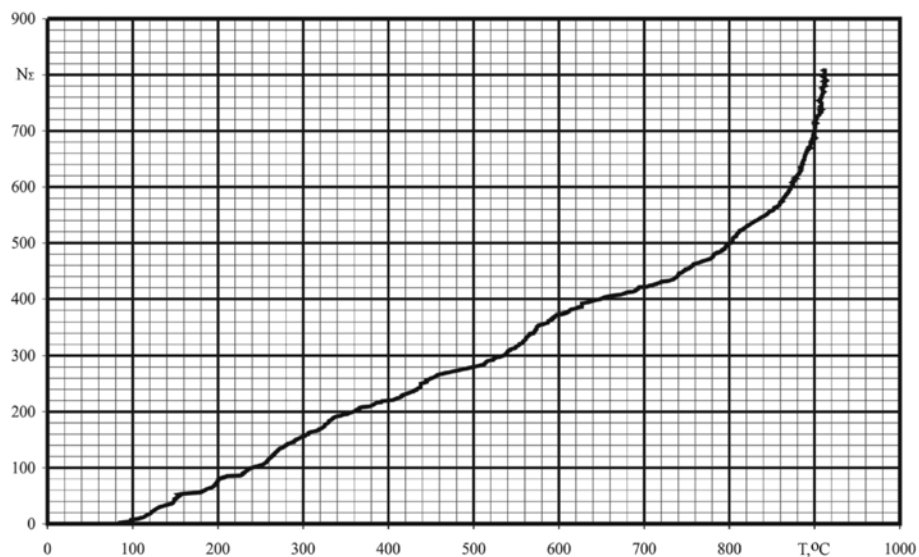


Рис. 6. Диаграмма суммарного счёта АЭ образцов из стали марки 30ХГСА при исследовании влияния аустенитного превращения

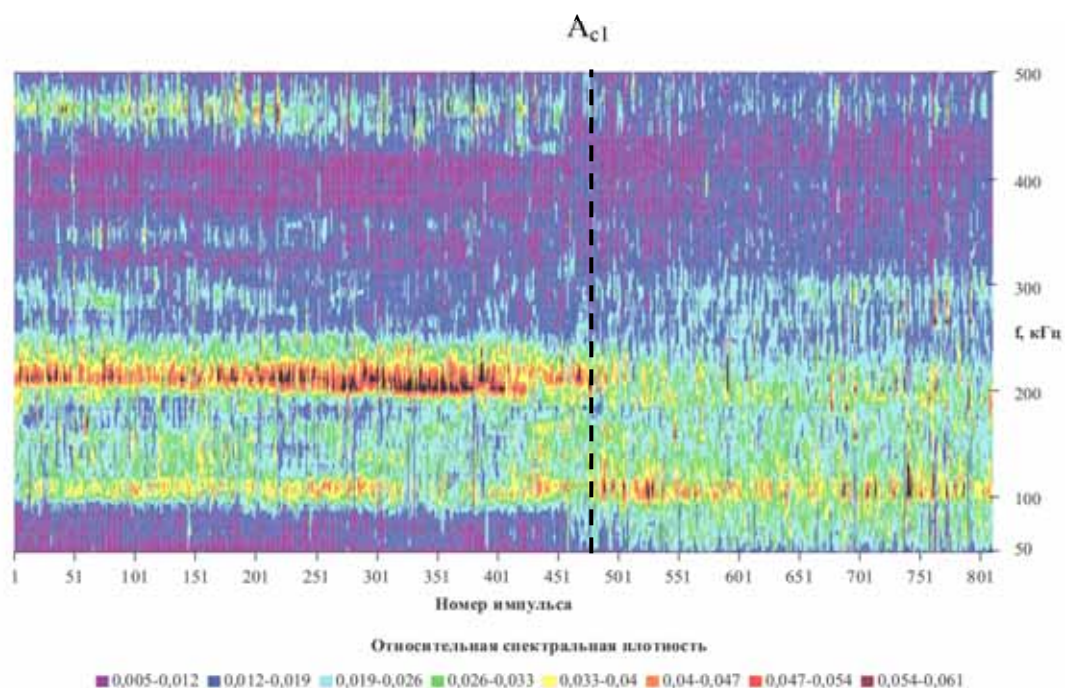


Рис. 7. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при исследовании аустенитного превращения в стали марки 30ХГСА

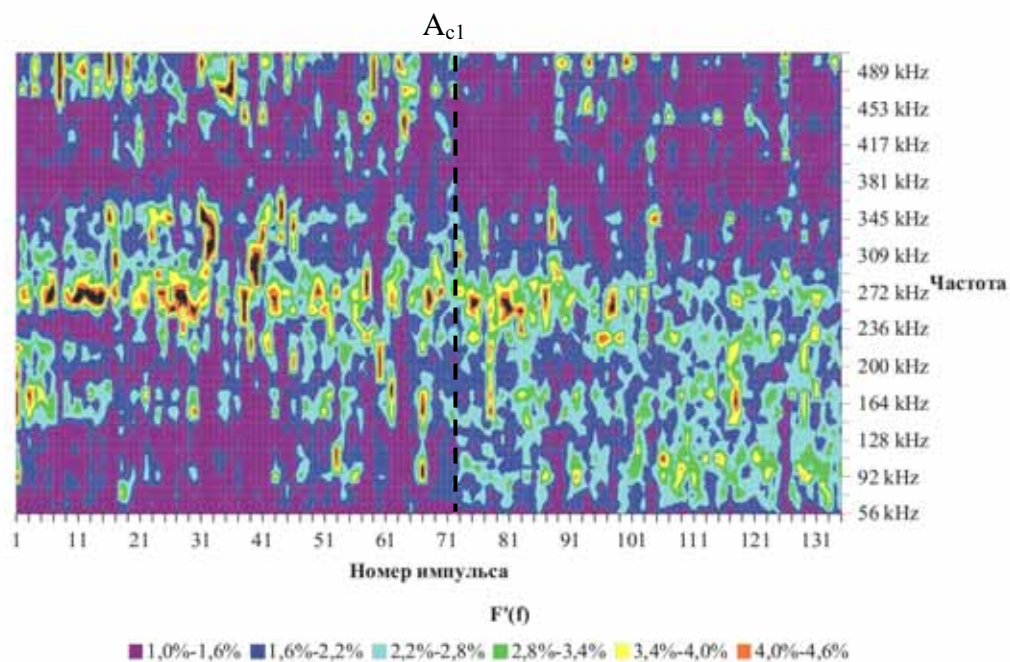


Рис. 8. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ во время нагрева нормализованной стали марки 20

Интересно, что спектр сигналов АЭ, излучаемых во время нагрева образцов до аустенитного превращения в значительной степени определяется не только химическим составом стали, но и структурой материала – мартенситной или перлитной (см. рис. 9 – 10). При этом у закалённого образца на спектрограмме АЭ наблюдается ещё одна характерная точка, совпадающая с областью распада остаточного аустенита (точка «А» см. рис. 9).

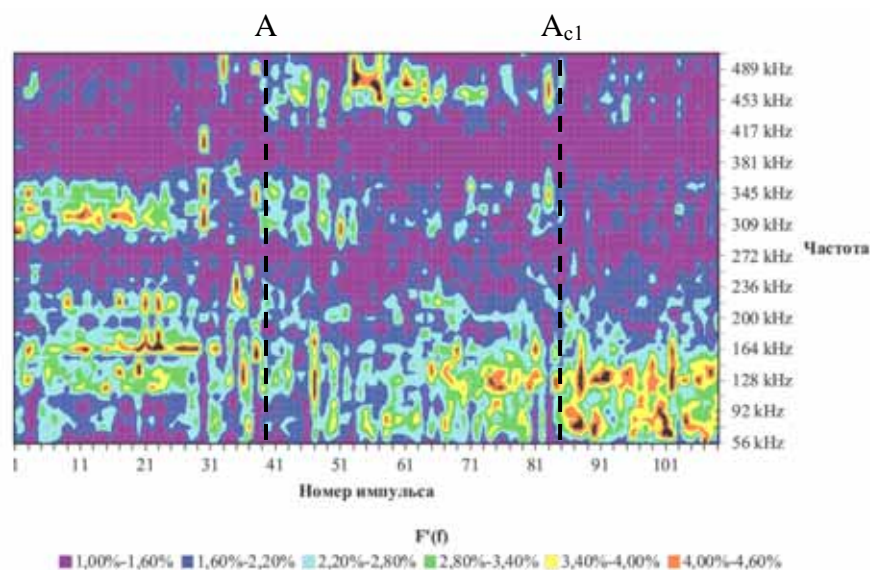


Рис. 9. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нагреве закалённой стали марки 45

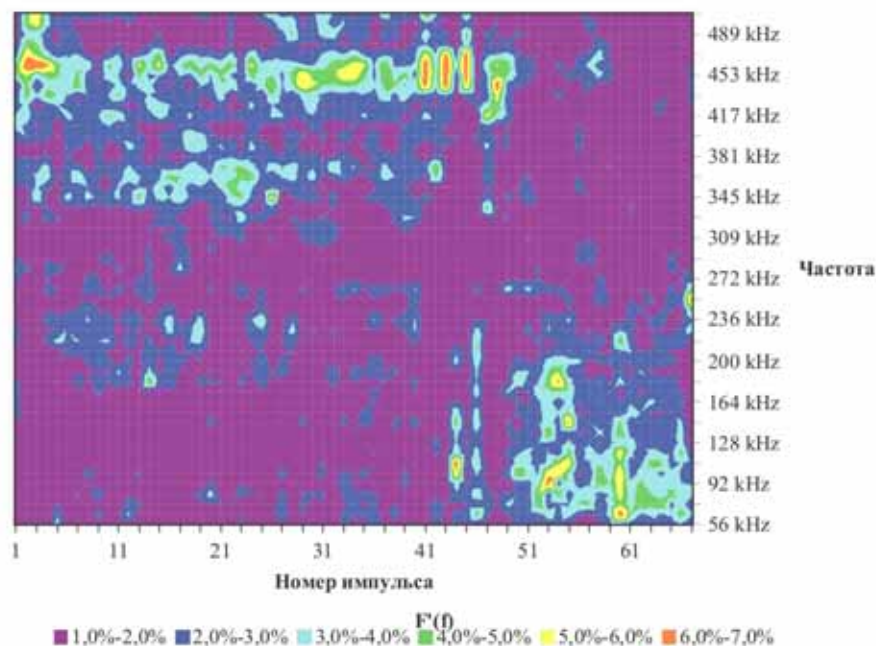


Рис. 10. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нагреве нормализованной стали марки 45

Следует заметить, что изменение спектра сигналов АЭ происходит не скачкообразно, а в некотором температурном интервале, при этом указанный интервал у закалённого образца шире. Указанные особенности могут быть объяснены неравномерным распределением температуры по объёму материала (во время нагрева), а также неравномерной структурой материала и неравномерной концентрацией в нём легирующих элементов, в результате чего аустенитное превращение начинается в локальных микрообъёмах и постепенно распространяется по всему объёму материала. Обнаруженные зависимости справедливы для всех марок исследованных сталей.

Полиморфное превращение в титановом сплаве марки ВТ-20 также влияет на параметры сигналов АЭ, снижая их активность (см. рис. 11 – 12), что, скорее всего, связано с ослаблением межзатомных связей, в результате чего снижается внутренняя энергия материала (которая раньше выделялась в виде АЭ), а сам материал становится более вязким, в результате повышается коэффициент поглощения звука и происходит демпфирование звуковых волн.

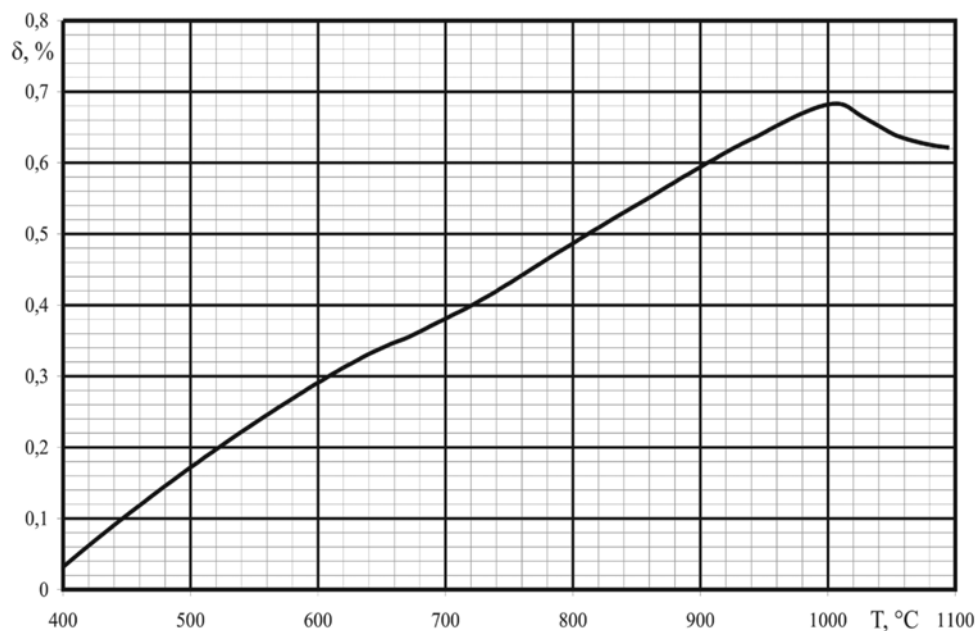


Рис. 11. Результаты дилатометрического исследования сплава ВТ-20

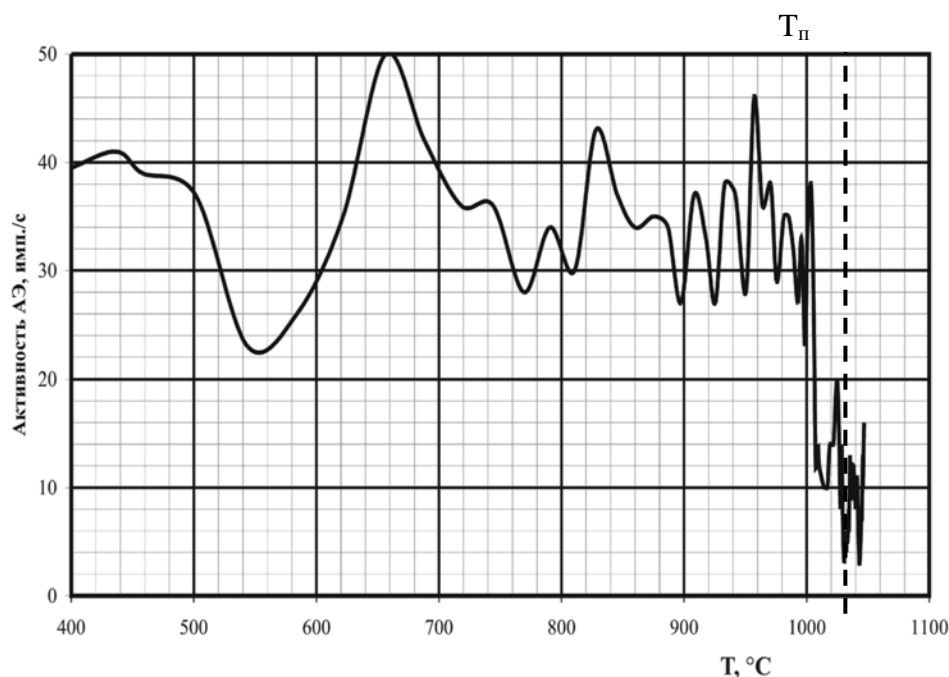


Рис. 12. Влияние полиморфного превращения в сплаве марки ВТ-20 на активность АЭ



## Основные выводы

1. Активное использование эффектов фазовых превращений является одним из перспективных направлений повышения эффективности различных технологических процессов изготовления металлических изделий. Максимальная эффективность применения фазовых превращений достигается при максимальном приближении температурно-временных условий термической обработки деталей к границе фазового перехода, исключая сам переход. Точное определение границ фазовых переходов является ключевой задачей на указанном пути повышения эффективности использования эффектов фазовых превращений.

2. Метод АЭ является перспективным методом определения критических точек фазовых превращений и исследования фазовых переходов. Данный метод позволяет быстро и дешево детектировать аустенитное, перлитное и иные полиморфные превращения непосредственно в обрабатываемой детали в реальном времени практически без ограничений по температурам, скоростям нагрева и охлаждения, что открывает большие возможности по созданию автоматизированных систем управления оптимальным циклом термической обработки сталей и сплавов.

3. Исследованные виды полиморфных превращений в значительной степени влияют на параметры сигналов АЭ. Аустенитное превращение сопровождается резким смещением спектра сигналов АЭ в низкочастотную область. Процессы распада остаточного аустенита при нагреве закалённых образцов вызывают «размытие» спектра АЭ в более широком диапазоне частот. Перлитное превращение сопровождается повышением активности АЭ и исключением из спектра сигналов АЭ низкочастотных составляющих. Кинетика излучения сигналов АЭ хорошо коррелирует с кинетикой превращения аустенита в перлит и может быть использована для количественной оценки перлитного превращения. Полиморфное превращение в титановых сплавах вызывает резкое снижение активности сигналов АЭ.

4. Характер спектра сигналов АЭ определяется структурой материала, практически не зависит от скорости термической обработки и имеет одинаковый вид для всех типов исследованных сталей.

5. Представляет значительный научный и практический интерес дальнейшее изучение влияния фазовых превращений на параметры сигналов АЭ, особенно на границе мартенситного и бейнитного превращений, а также подтверждение полученных результатов на других типах конструкционных сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Муравьёв, В. И. *Обеспечение надёжности конструкций из титановых сплавов* / В. И. Муравьёв, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов [и др.]. – М.: Эком, 2009. – 752 с.
3. Изотермическая закалка как инструмент наноформирования дефектной структуры стали P18 для улучшения эксплуатационных характеристик режущего инструмента / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, А. М. Злыгостев [и др.] // *Металлообработка*. – 2009. – № 2. – С. 50-57.
4. Исследование влияния фазовых превращений на субструктуру и свойства среднелегированных сталей / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, А. М. Мартынюк [и др.] // *Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. МНТК*. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 282-286.
5. Влияние фазовых превращений на субструктуру и свойства среднелегированных сталей / А. В. Фролов, В. И. Муравьёв, А. М. Мартынюк [и др.] // *Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы МНТК*. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 382-389.
6. Семашко, Н. А. *Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении* / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, В. И. Муравьёв. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
7. Зимин, Н. В. *О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита* / Н. В. Зимин // *Металлообработка*. – 2006. – № 1. – С. 13-16.

**Свиридов А.В.**

СУШКА ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

**Свиридов А. В.**

**A.V.Sviridov**

## СУШКА ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

### DRYING OF SHELL MOULDS PRODUCED BY ELECTROPHORETIC DEPOSITION



**Свиридов Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: magistr010@rambler.ru.

**Mr. Andrey V. Sviridov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: magistr010@rambler.ru

**Аннотация.** В статье изложены краткие данные о сушке электрофоретических оболочковых форм, приводится описание процесса электроосмотической сушки оболочек, а также экспериментальные данные, касающиеся сушки оболочек.

**Summary.** The paper overviews data on drying of electrophoretic shell moulds. Also a description of the process of electro osmotic drying of shell moulds is given along with experimental data on shell mould drying.

**Ключевые слова:** электроосмос, оболочковая форма, электрофорез, электрофоретическая суспензия, литейная форма.

**Key word:** electric osmosis, shell mould, electrophoresis, electrophoretic suspension, casting mould.

УДК 621.74.045

В отличие от изготовления оболочковой формы (ОФ) по традиционной технологии, когда формообразование осуществляется последовательным наращиванием четырех – шести слоев, с толщиной каждого около 1 мм, при электрофорезе за 1 – 2 мин образуется оболочка в 5 – 6 мм. При сушке по общепринятой методике в такой форме возникают достаточно большие концентрационные напряжения, которые могут вызывать появление трещин и разрушение оболочек.

Физико-механические характеристики фретических осадков во многом зависят от режимов сушки, обуславливающих скорость удаления жидкой фазы и распределение полей влагосодержания и температуры по толщине формы. Неравномерность распределения влаги и температуры приводит к напряженному состоянию, и является причиной разрушения электрофоретических ОФ [1; 2].

Исследователями в данной области было предложено много вариантов и методик сушки ОФ, изготовленных методом электрофореза [2; 3; 4].

Например, с целью сокращения цикла формообразования литейные формы предложили сушить двухступенчатым режимом [2]. Первый при температуре 22 – 25 °С и влажности 60 – 80 %, который длится 2 – 3 ч. Во время второго периода температуру поднимают до 30 °С, а влажность понижают до 40 % и сушат в течение 6 – 8 ч.

В [3] описан способ сушки ОФ с использованием ультразвукового поля частотой 22 – 44 кГц, которым воздействуют циклически с продолжительностью цикла 2 – 3 мин и интервалами между циклами 5 – 6 мин. Причем воздействие ультразвуком совмещают с вен-

тиляцией формы в сушильной камере с температурой воздуха 32 °С. Реализация описанного способа, по словам авторов, позволила снизить трещинообразование форм при сушке.

С целью улучшения физико-механических свойств ОФ и повышения качества отливок в [4] предлагается сырую ОФ обрабатывать 1 – 3 мин в электромагнитном поле с частотой 1200 – 1600 МГц, после чего возможно производить операцию выплавления модельного состава в поле при частоте 300...900 МГц в течение 2 – 5 мин.

Также известны способы изготовления фореетических ОФ с использованием наноразмерных материалов, таких как аэросил (отечественный аналог – таркосил), сиацит [5; 6], введение которых позволяет снизить исходную влажность форм до 3 – 4 %. Использование наноматериалов, концентрация которых доходит от 4 до 8 % от массы суспензии, неизбежно приведет к удорожанию смеси и безвозвратной потере их при регенерации суспензии.

Одним из перспективных может стать метод электроосмотической сушки, который позволяет повысить прочность форм и снизить брак по трещинам [7]. При этом форму погружают в емкость с токопроводящим материалом, который сначала находится в псевдооживленном состоянии для равномерного его распределения вокруг оболочки при осмосе. Для сушки ОФ различной конфигурации в установке предусмотрены подвижные штыри. После приведения электропроводящего материала в обычное состояние и при включении тока происходит фильтрационный перенос влаги из внутренних слоев к поверхности формы, т.е. осуществляется электроосмотическая сушка форм [7].

Данный метод сушки не требует сложного оборудования, в отличие от рассмотренных выше, и позволяет регулировать процесс удаления влаги из форм.

В работе сравнивали кинетику сушки фореетических оболочек при электроосмотическом переносе влаги и обычных условиях. Для изготовления ОФ использовали разработанную ранее электрофореетическую суспензию [8] и известное токопроводящее покрытие, на основе едкого натра и жидкого стекла [9], а оболочку формировали при напряжении 60 В в течение 1 мин (см. рис. 1). Контролировали снижение веса оболочки через каждые 30 мин (см. рис. 2).

Приведенные данные показывают, что при электроосмотической сушке удаление влаги из ОФ проходит интенсивнее, чем при сушке в обычных условиях. Уже через 1,5 – 2 ч сушки электроосмосом из формы удаляется более половины всей влаги (см. рис. 2, кривая 1), а при обычных условиях за тот же период форма теряет не более трети жидкой фазы (см. рис. 2, кривая 2).

Через 3 ч проведения электроосмоса в форме остается не более 2 % воды, а во втором варианте около 4 %. Далее при сушке осмосом потеря формой влаги замедляется, что можно объяснить разрушением токопроводящего слоя, необходимого для ведения процесса. В другом варианте после 3 ч сушки оболочка теряет примерно по 1 % воды в час и после 5 ч сушки процесс замедляется и масса снижается менее чем на 1 % в час.

Исходя из этого, можно рекомендовать проведение сушки в два этапа: в течение 3 ч электроосмосом, а далее при обычных условиях. При этом время сушки сокращается с 8 – 9 ч при нормальных условиях до 4 – 5 ч при сушке комбинированием процессов влагоудаления.



Рис. 1. Оболочковая форма

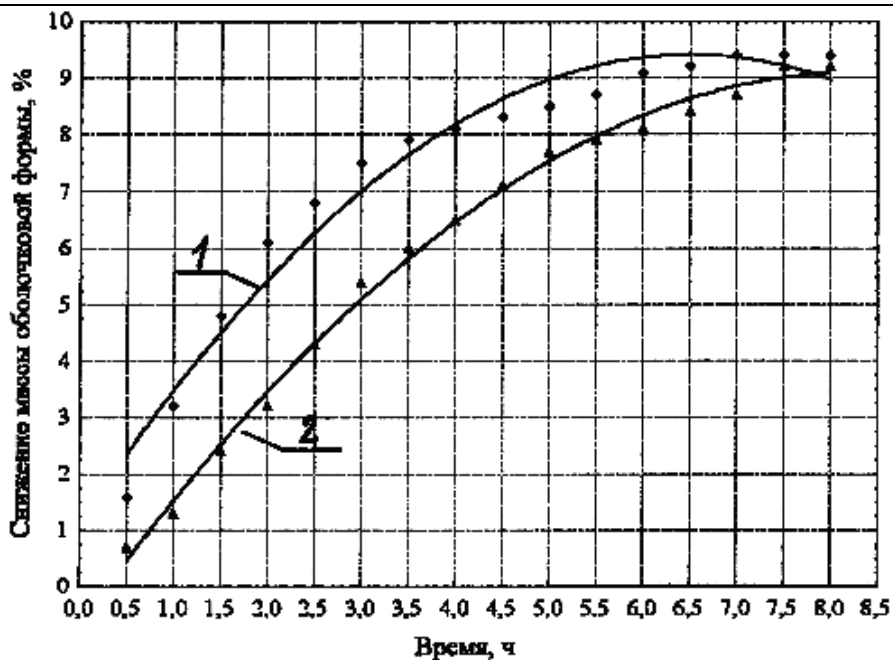


Рис. 2. Кинетика сушки электрофоретических ОФ при различных условиях:  
1 – сушка электроосмосом; 2 – сушка на воздухе, при нормальных условиях

Плотность тока при электроосмотическом переносе влаги не превышает  $0,014 \dots 0,015 \text{ А/см}^2$ , а удельная рассеиваемая мощность составляет  $1,5 - 2,0 \text{ Вт/см}^2$  на единицу площади ОФ. Это существенно ниже мощности, потребляемой при сушке форм за тот же период времени в сушильных шкафах, что приведет к снижению стоимости готовых изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков, И. В. Электрофорез в литейном производстве / И. В. Рыжков [и др.] // Литейное производство. – 1977. – № 11. – С. 30-31.
2. Рыжков, И. В. Электрофорез в литейном производстве. Изготовление оболочковых форм по выплавляемым моделям / И. В. Рыжков [и др.]. – Харьков: Вища школа, 1979. – 160 с.
3. А.с. 899231 СССР, Кл. В 22 С 1/00. Способ сушки литейных форм, получаемых по выплавляемым моделям электрофоретическим осаждением / А. Н. Бушуев, Н. А. Качхоева [и др.] (СССР). – № 2864040/22-02; заяв. 03.01.80; опубл. 23.01.82. Бюл. № 3. – 2 с.
4. А.с. 831325 СССР, Кл. В 22 С 1/18. Способ удаления легкоплавких моделей из литейных керамических форм / Ю. П. Васин, В. А. Лонзингер [и др.] (СССР). – № 2830686/22-02; заяв. 17.10.79; опубл. 23.05.81. Бюл. № 19. – 2 с.
5. А.с. 966985, Кл. В 22 С 9/04. Способ изготовления керамических литейных форм электрофорезом / П. А. Никифоров, В. В. Бандуркин. (СССР). – № 28670450/22-02; заяв. 28.12.1979; опубл. 23.08.82. Бюл. № 18. – 3 с.
6. Кулаков, Б. А. Суспензия на основе кремнезоль для изготовления оболочковых форм методом электрофореза по постоянным моделям / Б. А. Кулаков, П. А. Никифоров. – Челябинск: Южно-Ур. гос. ун-т, 2000. – 15 с.
7. А.с. 1018779 СССР, Кл. В 22 С 5/04 Установка для сушки оболочковых форм / А. Н. Бушуев, Л.Н. Бушуева. (СССР). – № 3394692/22-02; заяв. 05.02.82; опубл. 23.05.83. Бюл. № 19. – 2 с.
8. Пат. 2316406 РФ, МПК В22С 1/02. Суспензия для получения керамических форм методом электрофореза / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, А. В. Свиридов; заяв. и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2005134840/02; заяв. 09.11.2005; опубл. 10.02.2008. Бюл. № 32. – 4 с.
9. А.с. 511134 СССР, Кл. В 22 С 1/00. Токопроводящее покрытие для изготовления керамических форм / И. М. Гарбер, А. Н. Бушуев (СССР). – № 2095773/02; заяв. 02.12.74; опубл. 25.04.76. Бюл. № 15. – 3 с.

**Степанова И. П., Осколова И. Д.**  
**I.P.Stepanova , I.D.Oskolova**

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАВМАТИЗМА НА ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»  
МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**ANALYSIS AND PREDICTION OF HUMAN INJURY AT THE "AMURMETAL" FAC-  
TORY BY MATHEMATICAL STATISTICAL METHODS**

**Степанова Ирина Павловна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

**Ms. Irina P.Stepanova** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); e-mail [Prof.Stepanova@mail.ru](mailto:Prof.Stepanova@mail.ru)

**Осколова Ирина Даниловна** – дипломник кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

**Ms. Irina D. Oskolova** – Master of Engineering student of the Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); e-mail [Prof.Stepanova@mail.ru](mailto:Prof.Stepanova@mail.ru)

**Аннотация.** В работе выполнена апробация метода прогностической оценки индивидуального риска травматизма и выявления групп риска персонала в превентивном режиме на примере предприятия ОАО «Амурметалл». Наряду с инновационными для анализа использованы классические методы анализа и прогнозирования риска травматизма.

**Summary.** The paper considers the issue of testing a new method for short-term and medium-term prediction of individual traumatism and identification of at-risk groups among the personnel of JSC "Amurmetall". As follows from the data of short-term forecasting, the most authentic data give a linear trend. For the medium-term forecasts the linear trend can not be applied, the logarithmic trend gives a pessimistic forecast, and exponents give an optimistic forecast. Along with innovative methods for analysis, classical methods for trauma risk prediction are also used.

**Ключевые слова:** риск, травма, прогноз, эффективность, управление.

**Key words:** risk, trauma, forecast, efficiency, management.

УДК. 614.84

Объектом исследования данной работы явился крупнейший на Дальнем Востоке металлургический комплекс ОАО «Амурметалл», обеспечивающее выплавку стали из лома черных металлов и производство сортового и листового проката. Уже более восьми лет завод ведет мощную реконструкцию производства, осваивает новые прогрессивные технологии. Одними из первых объектов, которые были сданы по плану программы технического перевооружения ОАО «Амурметалл», стали два современных комплекса переработки лома – пресс-ножницы «Vezzani». В 2006 г. осуществлена модернизация дуговой сталеплавильной печи ДСП-125. В 2007 г. введен в эксплуатацию АКП – агрегат «ковш-печь» в электросталеплавильном цехе. В 2008 г. дальневосточные металлурги планировали осуществить главную задачу масштабной реконструкции и модернизации предприятия – выйти на годовое производство стали 2150 тыс. т. В течение года коллектив ОАО «Амурметалл» упорно осваивал новую эффективную электросталеплавильную печь фирмы «Concast». В итоге, впервые за



одиннадцатилетнюю историю предприятия, показатель производства стали за год превысил 1 млн т. В октябре 2008 г. было завершено строительство и освоена технология самого крупного проекта на Дальнем Востоке и в металлургической отрасли России – слябовая машина непрерывного литья заготовок «SMS-Demag» [1; 2].

Для изучения производственного травматизма на изучаемом объекте были рассмотрены журналы регистрации несчастных случаев на производстве, информационные сообщения об отчетных несчастных случаях, произошедших в ОАО «Амурметалл» за десятилетний период с 1999 по 2008 гг. За рассматриваемый период было зафиксировано 122 несчастных случая, из них тяжелых – 26 и со смертельным исходом – 6.

Для оценки уровня производственного травматизма был использован следующий ряд стандартных показателей [3; 4]:

$$K_{\text{ч}} = 1000N/P, \quad K_{\text{т}} = \frac{\sum D}{N}, \quad K_{\text{см}} = 1000 * \frac{N_{\text{см}}}{P}, \quad K_{\text{п}} = K_{\text{ч}} * K_{\text{т}},$$

где  $K_{\text{ч}}$  – коэффициент частоты (характеризует число несчастных случаев, приходящихся на 1000 работающих за определенный период времени (обычно за год)). В настоящем исследовании этот показатель называется также «риском травматизма» и обозначается  $R^*$ :  $R^* = 1000N/P$ ;  $N$  – количество несчастных случаев, произошедших в организации за рассматриваемый период;  $P$  – среднесписочная численность работающих за тот же период времени, чел.;  $K_{\text{т}}$  – коэффициент тяжести (характеризует среднюю длительность временной нетрудоспособности, приходящуюся на один несчастный случай, происшедший на производстве);  $\sum D$  – суммарное количество дней нетрудоспособности по всем травмированным за рассматриваемый период (обычно за год);  $K_{\text{см}}$  – коэффициент смертности (количество несчастных случаев со смертельным исходом, приходящихся на 1000 работающих);  $N_{\text{см}}$  – количество несчастных случаев со смертельным исходом за рассматриваемый период;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент потерь (отражает общее количество дней нетрудоспособности, приходящихся на 1000 чел.):  $K_{\text{п}} = 1000 \sum D/P$ .

В табл. 1 – 2 представлены рассчитанные значения коэффициентов частоты, тяжести и смертности для ОАО «Амурметалл» за 1999 – 2008 гг.

Таблица 1

Коэффициенты частоты и тяжести ОАО «Амурметалл» (1999 – 2008 гг.)

Год	Коэффициент частоты $K_{\text{ч}}$	Коэффициент тяжести $K_{\text{т}}$
1999	5,8	29,3
2000	3,07	51,8
2001	3,21	43,8
2002	6,25	43,4
2003	3,32	55
2004	5,18	24,6
2005	2,09	56,9
2006	1,67	47,7
2007	1,9	37,4
2008	2,26	48,7
<b>Среднегодулетний уровень риска общего травматизма</b>	<b>3,47</b>	

### Коэффициент смертности ОАО «Амурметалл» (1999 – 2008 гг.)

Год регистрации со смертельным исходом	1999	2004	2005	2007	Итого за 10 лет
N <sub>см</sub>	2	1	1	2	6
P	2068	5023	5730	5276	3597
K <sub>см</sub>	0,96	0,19	0,17	0,38	1,7
<b>Среднегодовое значение риска смертности</b> <b><math>K_{см\text{СрМн}} = 1000 * (\sum N_{см}/P) / 10</math></b>					<b>0,17</b>

На рис. 1 построена «пирамида несчастных случаев» («треугольник» по теории Хайнриха). Основание пирамиды – это численность работающего персонала, средняя часть – количество травм в этой выборке в течение года, вершина пирамиды – количество травм со смертельным исходом. В течение года из каждой 1000 работающих травмируются 3,47 чел., а из 20 травм один закончится смертельным исходом (или из 3597 травмируются 20 чел., в том числе 1 со смертельным исходом). Все данные среднегодовые, рассчитанные за исследованный десятилетний период.

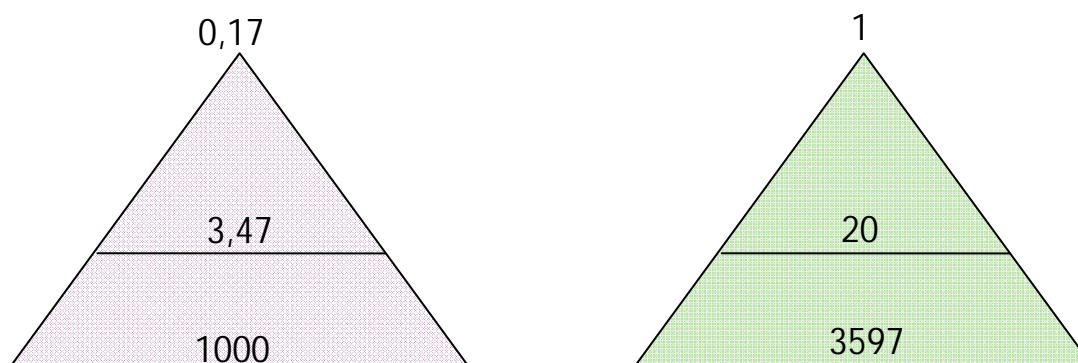


Рис. 1. Пирамида несчастных случаев со смертельным исходом

Максимальный риск смертности от производственных травм зафиксирован в 1999 г., максимальный риск общего травматизма – в 2002 г.

Среднеотраслевой показатель страховых случаев на 1000 работающих для вида экономической деятельности – производство стали (ОКВЭД: 27.14) – выведен из Постановлений Фонда социального страхования «Об утверждении средних значений основных показателей для расчета скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» [5; 6; 7; 8]. Данный показатель страхового тарифа за период с 2001 по 2008 гг. представлен в табл. 3.

Среднегодовое значение отраслевого риска травматизма составляет 2,76 случая на 1000 чел. Среднегодовое значение риска травматизма на исследуемом предприятии составляет 3,47 – в 1,25 раз выше, чем среднегодовое значение отраслевого риска травматизма (2,76).

С помощью стандартной программы «Excel» сделан краткосрочный прогноз риска травматизма по линии тренда (сглаженной кривой). Линия тренда строилась тремя способами: линейным, логарифмическим и экспоненциальным (см. рис. 2 – линейный тренд).

В ходе исследования удалось сравнить достоверность краткосрочного прогноза на следующий 2009 г. (см. табл. 4). Как следует из представленных данных, при краткосрочном прогнозировании (на следующий год) наиболее достоверные результаты дает линейный тренд: ошибка прогнозирования составила 23 %.

Отраслевой коэффициент травматизма для производства стали (ОКВЭД: 27.14)

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
$R_{\text{бвэд}}$	2,77	3,24	2,72	2,47	2,24	3,27	2,83	2,57
<b>Среднегодушлиный уровень отраслевого риска травматизма</b>								<b>2,76</b>

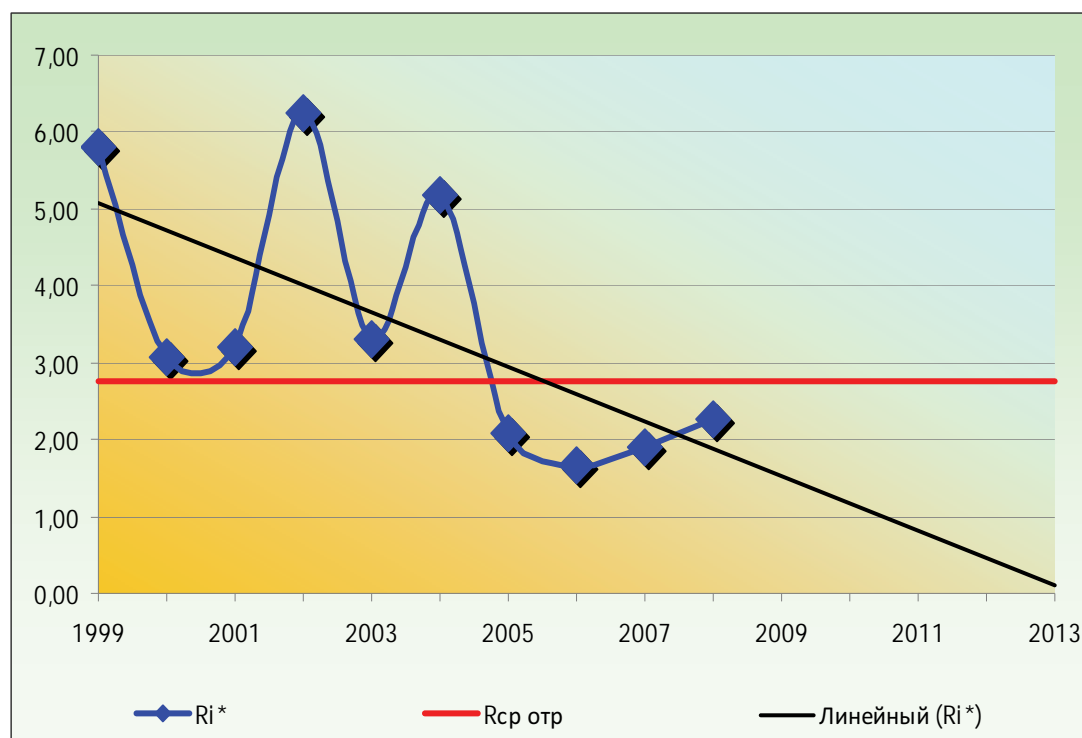


Рис. 2. Линейный тренд заводского травматизма

Таблица 4

Прогностический и реальный уровень травматизма в 2009 г. на 1000 работающих

$R_{\text{факт}}$ 2009 г.	Прогноз на 2009 г.			Ошибка прогноза, %		
	$R_{\text{линейная}}$	$R_{\text{логарифм.}}$	$R_{\text{экспоненц.}}$	$\Delta R_{\text{линейная}}$	$\Delta R_{\text{логарифм.}}$	$\Delta R_{\text{экспон.}}$
1,3	1,6	2,3	1,75	23	77	35

На рис. 3 дано сравнение показателей заводского и отраслевого травматизма. Тенденция снижения риска травматизма на ОАО «Амурметалл» к отраслевому отмечается с 2005 г. (на заводе в этот период проводится модернизация основного производства). Это позволило предприятию в 2005 г. начать подготовку к установлению скидок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

С 2006 г. ОАО «Амурметалл» имеет скидки к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, а это экономия десятков миллионов рублей.



Рис. 3. Динамика заводского и отраслевого травматизма с 1991 по 2008 гг.

Можно надеяться, что продолжающаяся модернизация производства вместе с повышенным вниманием к реализации методов предотвращения травматизма позволит сохранить эту тенденцию и в будущем прогнозные значения травматизма – 1,3 на 1000 работающих – (см. рис. 4) станут реальностью.

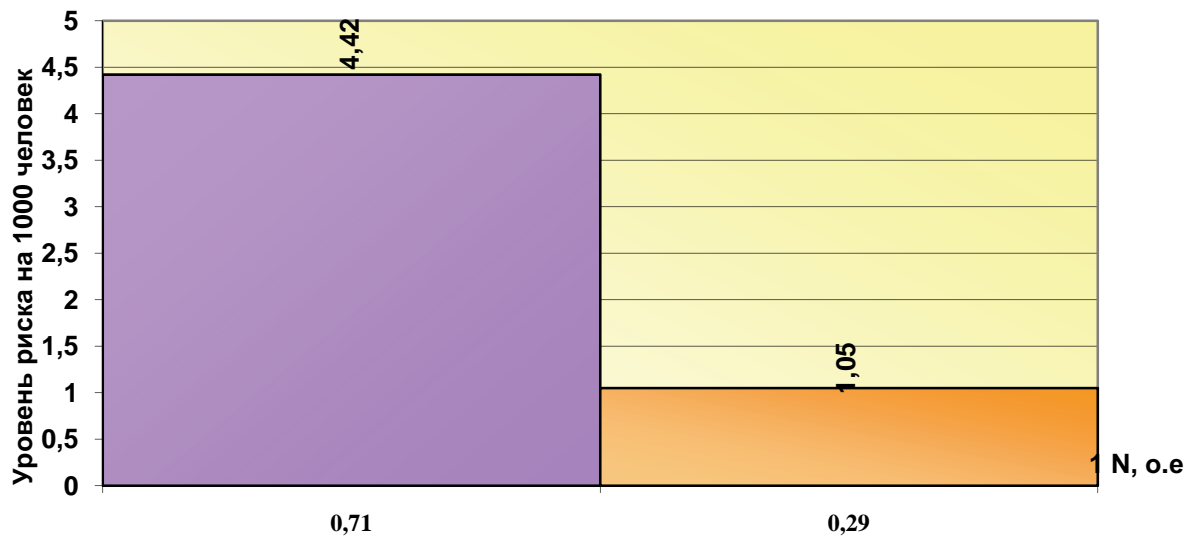


Рис. 4. Кривая распределения травматизма на ОАО «Амурметалл» по половому признаку

На рис. 4 – 6 показано распределение риска травматизма в расчете на 1000 работающих по следующим признакам: пол, стаж, возраст, профессия и проведено ранжирование групп риска персонала по указанным признакам на основе обработки ретроспективных данных за исследованный 10-летний период.

Как следует из представленных на рис. 5 данных, риск мужского травматизма (4,42 случая на 1000 работающих) в 4 с лишним раза выше риска женского травматизма и превышает и среднеотраслевой (2,76 случая на 1000 работающих) в 1,6 раза и среднедолголетний заводской (3,47 случая на 1000 работающих) в 1,3 раза.

В ОАО «Амурметалл» за исследуемый период с 1999 по 2008 гг. доля травмированных мужчин составляет 71 % от общего количества травмированных. Женщины работают на более легких работах, в основном во вспомогательном производстве, менее травмированы, их доля составляет 29 % от общего количества травмированных.

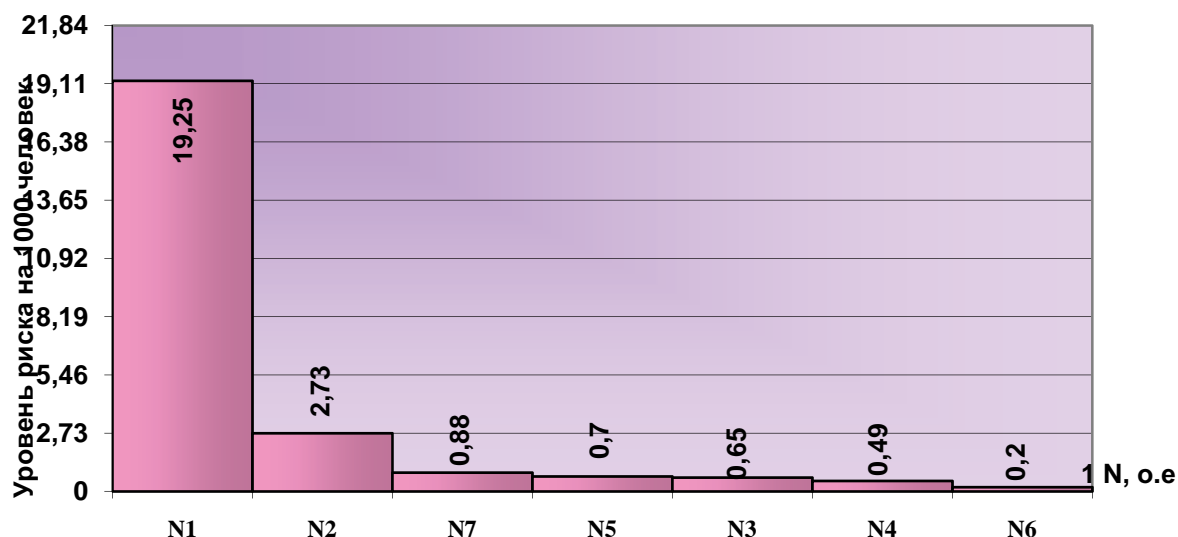


Рис. 5. Кривая распределения травматизма на ОАО «Амурметалл» по стажу

Ранжирование стажевых групп персонала по уровню риска травматизма (см. рис. 6) имеет следующий вид:

1-е место – группа  $N_1$  – стаж работы до 5 лет (относительная численность группы  $N_1 = 0,13$ , или 13 % от общего количества травмированных);

2-е место – группа  $N_2$  – стаж работы от 5 до 10 лет ( $N_2 = 0,21$ );

3-е место – группа  $N_7$  – стаж работы свыше 30 лет ( $N_7 = 0,04$ );

4-е место – группа  $N_5$  – стаж работы 20-25 лет ( $N_5 = 0,16$ );

5-е место – группа  $N_3$  – стаж работы 10-15 лет ( $N_3 = 0,17$ );

6-е место – группа  $N_4$  – стаж работы 15-20 лет ( $N_4 = 0,18$ );

7-е место – группа  $N_6$  – стаж работы 25-30 лет ( $N_6 = 0,11$ ).

Риск травматизма в группе персонала со стажем до 5 лет в 5,5 раз превышает средне-многолетний заводской риск травматизма (3,47) и в 7 раз выше среднеотраслевого уровня (2,76). Во всех остальных выделенных стажевых группах персонала уровень риска травматизма меньше и среднемноголетнего заводского, и среднеотраслевого.

Места по травмоопасности в возрастных группах распределились следующим образом (см. рис. 7):

1-е место – группа  $N_1$  – возраст до 25 лет ( $N_1 = 0,11$ );

2-е место – группа  $N_5$  – возраст более 55 лет ( $N_5 = 0,07$ );

3-е место – группа  $N_2$  – возраст 25-35 лет ( $N_2 = 0,24$ );

4-е место – группа  $N_4$  – возраст 45-55 лет ( $N_4 = 0,25$ );

5-е место – группа  $N_3$  – возраст 35-45 лет ( $N_3 = 0,33$ ).

Как видно их гистограммы (см. рис. 7), на ведущих позициях (1-2-е места) по травмоопасности в профессиональной деятельности оказались не основные профессии металлургического производства, а те профессии, доля персонала которых от относительной численности работающих наименьшая: машинист бульдозера – 0,0006 о.е., кузнец – 0,0007 о.е., а количество несчастных случаев в 1,5 – 2 раза выше, чем у сталевара (0,0005 о.е.) и обжигальщика извести (0,0005 о.е.).

Травмоопасные профессии металлургического производства расположены выше среднемноголетнего заводского риска и только 7 профессий (25,9 % от общего списка) ниже среднемноголетнего риска и 5 профессий (18,5 % от общего списка) ниже среднеотраслевого риска.

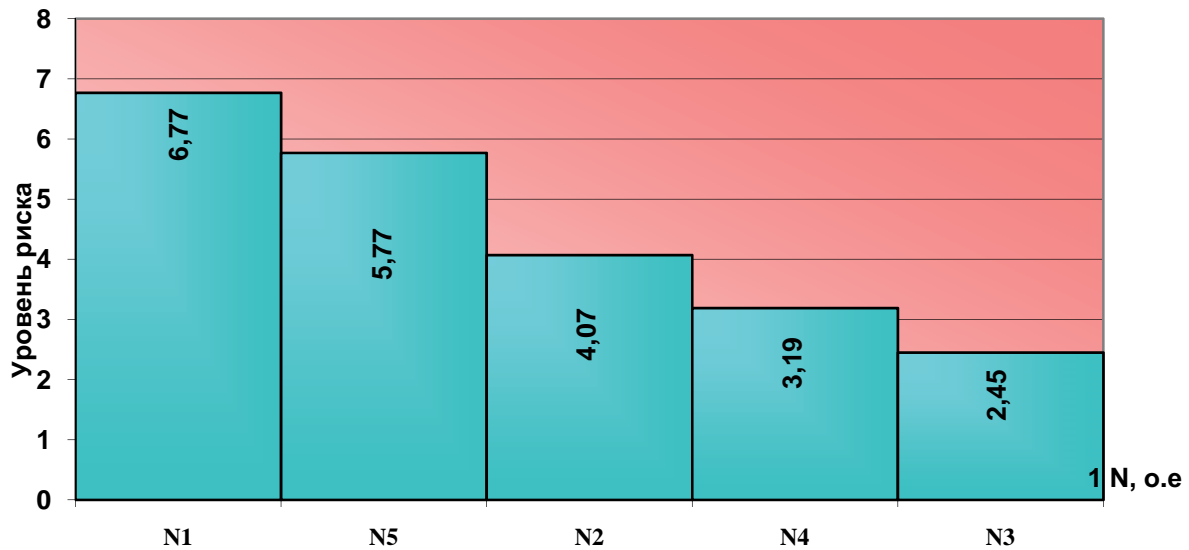


Рис. 6. Кривая распределения травматизма на ОАО «Амурметалл» по возрасту

В работе [12] был изложен алгоритм прогнозирования персонифицированного риска на основе данных ретроспективного анализа произошедших событий. Идея заключается в том, что можно прогнозировать индивидуальный риск травматизма для каждого работника как сумму известных из ретроспективного анализа рисков травматизма групп, к которым принадлежит человек.

Индивидуальный риск  $n$ -й персоны определяется по выражению

$$R_n = \sum(R_i \alpha_i),$$

где  $R_n$  – прогнозируемый индивидуальный риск  $n$ -й персоны;  $R_i$  – уровень риска по группе  $i$  (например: профессия, стаж, возраст, пол), соответствующий принадлежности к данной группе  $n$ -й персоны по набору признаков;  $\alpha_i$  – вес риска по  $i$ -й группе признака (прогностический коэффициент), например: профессия, стаж, возраст, пол; тогда  $R_n$  можно представить в виде:

$$R_n = R_{\text{Проф}} \alpha_{\text{Проф}} + R_{\text{Стаж}} \alpha_{\text{Стаж}} + R_{\text{Возр}} \alpha_{\text{Возр}} + R_{\text{Пол}} \alpha_{\text{Пол}}.$$

Вес риска  $\alpha_i$  может быть определен либо с помощью модифицированного вероятностного метода Байеса [13; 14] (метода нормированных интенсивных показателей), либо с помощью метода экспертных оценок [12; 14].

Согласно **методу Байеса**, следует ввести следующие весовые коэффициенты и нормирующие показатели:

- нормирующий показатель (среднемноголетний уровень риска)

$$\text{НП} = R_{\text{Срмн}} = (\sum n_j / N_j) / M,$$

где НП – нормирующий показатель;  $n_j$  – количество случаев травмирования в  $j$ -й год;  $N_j$  – среднесписочная численность работников в  $j$ -й год;  $M$  – число лет ретроспективного анализа;

- весовые коэффициенты

$$K_i = R_{\text{max } i} / R_{\text{min } i},$$

где  $R_{\text{max } i}$  и  $R_{\text{min } i}$  – это максимальный и минимальный уровень риска в кривой распределения риска по каждому признаку  $i$ : пол, возраст, стаж, профессия. Чем больше этот показатель,

тем больше значимость фактора. При отсутствии влияния фактора на уровень риска травматизма отношение равно или близко к единице.

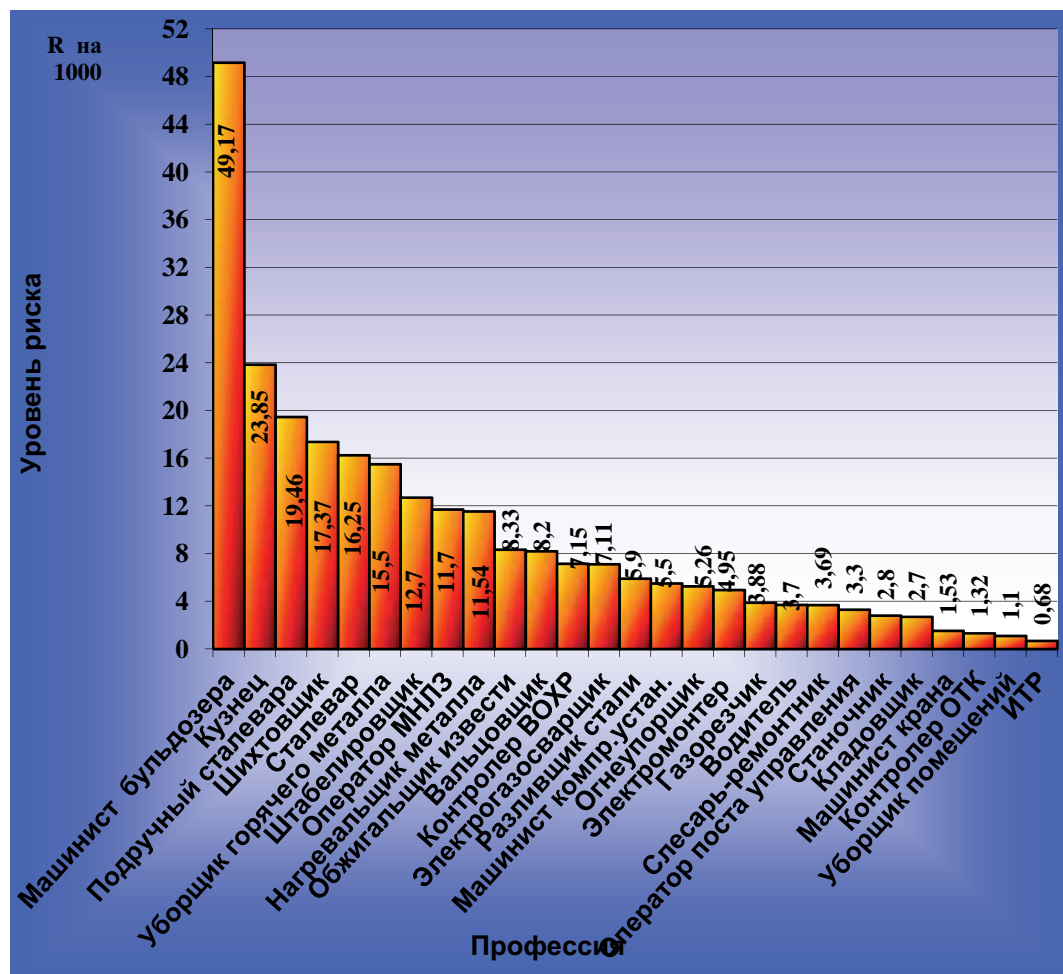


Рис. 7. Кривая распределения травматизма на ОАО «Амурметалл» по профессии

Вес риска по  $i$ -й группе признака  $\alpha_i$  определяется по выражению

$$\alpha_i = K_i / (\text{НП} \sum K_i).$$

Если в качестве групп выбраны профессия, стаж, возраст, пол, то выражения для расчета весовых коэффициентов примут вид:

$$\alpha_{\text{Проф}} = K_{\text{Проф}} / (\text{НП} \sum K_i);$$

$$\alpha_{\text{Стаж}} = K_{\text{Стаж}} / (\text{НП} \sum K_i);$$

$$\alpha_{\text{Возр}} = K_{\text{Возр}} / (\text{НП} \sum K_i);$$

$$\alpha_{\text{Пол}} = K_{\text{Пол}} / (\text{НП} \sum K_i);$$

$$\sum K_i = K_{\text{Проф}} + K_{\text{Стаж}} + K_{\text{Возр}} + K_{\text{Пол}}.$$

**По методу экспертных оценок** коэффициенты  $\alpha_i$  определяются с помощью метода простого анкетирования. Этот метод предполагает одноразовый опрос экспертов с помощью анкет. В качестве экспертов могут выступать специалисты и руководители с большим стажем работ, имеющие достаточный опыт работы и хорошо знающие специфику деятельности исследуемого персонала и сам персонал.

Экспертам необходимо оценить вклад каждого фактора (профессия, стаж, возраст, пол) в уровень риска травматизма по 10-балльной шкале.



Таблица 8

Бригада № 1 участка переработки лома ЦПЛ ОАО «Амурметалл»

Код, №	Профессия	Стаж	Возраст	Пол
001	Шихтовщик	6 месяцев	20	м
002	Начальник участка	11 лет	51	м
003	Шихтовщик-прессовщик	2 года 9 месяцев	23	м
004	Мастер	7 лет	55	м
005	Шихтовщик	1 год 6 месяцев	43	м
006	Машинист крана	12 лет	31	ж
007	Шихтовщик	5 лет 6 месяцев	29	м
008	Мастер	2 года	56	м
009	Газорезчик	1 год 5 месяцев	21	м
0010	Машинист крана	25 лет	49	ж
0011	Слесарь-ремонтник	1 год	56	м
0012	Слесарь-ремонтник	24 года 2 месяца	43	м
0013	Прессовщик	15 лет	34	м
0014	Газорезчик	4 года	50	м
0015	Машинист крана	3 года 1 месяц	22	ж
0016	Электромонтер	13 лет	62	м
0017	Электрогазосварщик	1 год 4 месяца	22	м
0018	Уборщик помещений	1 год	32	ж
0019	Контролер лома	9 лет	40	м
0020	Слесарь-ремонтник	8 лет 8 месяцев	38	м
0021	Слесарь-ремонтник	6 месяцев	19	м
0022	Газорезчик	11 лет	37	м
0023	Электромонтер	6 лет 2 месяца	25	м
0024	Электрогазосварщик	27 лет	46	м
0025	Уборщик помещений	12 лет	55	ж
0026	Контролер лома	1 год 3 месяца	23	м

Затем по каждой группе признаков отдельно «мнения» (балльные оценки экспертов) усредняются. В качестве среднего используется медиана.

После определения средних оценок (медиан) определяют сумму средних значений:

$$S = \sum X_{i \text{ ср}},$$

где  $S$  – сумма средних значений;  $i$  – признак группы (профессия, стаж, возраст, пол);  $X_{i \text{ ср}}$  – медиана (средняя оценка) по  $i$ -й группе признака (профессия, стаж, возраст, пол).

Относительная экспертная оценка рассчитывается по выражению

$$\alpha_i = X_{i \text{ ср}} / S = X_{i \text{ ср}} / \sum X_{i \text{ ср}}.$$

Метод экспертных оценок позволяет закладывать интуитивные знания людей об очень сложном явлении, что на практике дает более приемлемые результаты, чем неоправданные попытки применить сложные математические методы в области исследования, где рассчитываемая величина – всего лишь ранг.

Ранжирование персонала по величине  $R_n$  позволит выявить группы с повышенным уровнем риска, а затем подобрать и адресно применить дополнительные профилактические меры, адекватные уровню угроз, для выявленных «слабых» групп.

В качестве **объекта прогнозирования** была выбрана бригада № 1 участка переработки лома ЦПЛ (цех подготовки лома) ОАО «Амурметалл». На этом участке случаев травматизма пока не было. Наша задача – выявить персонал, который находится в более рискованных

условиях, чем другие, и предложить для них в превентивном режиме комплекс профилактических мероприятий по снижению риска травматизма.

Информация по объекту исследования преобразована и представлена в табл. 8. Фамилии членов бригады закодированы в порядковые номера 001...0026.

Прогнозирование индивидуального риска проводим исходя из предположения, что в будущем у персонала, обладающего соответствующими признаками (профессия, пол, возраст, стаж), риск травматизма будет таким же, как был в ретроспективе.

На рис. 8 представлены результаты расчета и ранжирования персонала по уровню риска травматизма для бригады № 1 участка переработки лома ЦПЛ. Весовые коэффициенты определены методом экспертных оценок. Выделение группы «риска» персонала выполнено методом сравнения со среднеголетним и среднеотраслевым уровнем риска травматизма.

Первую группу травмоопасных профессий, с уровнем риска травматизма выше среднеголетнего, составили: 001, 005, 007 (шихтовщики), 003 (шихтовщик-прессовщик), 0017 (электрогазосварщик), 0021, 0011 (слесаря-ремонтники), 0014, 009 (газорезчики), 008 (мастер участка), 0026 (контролер лома), 0015 (машинист крана), 0018 (уборщик помещений), 0023 (электромонтер).

Во вторую группу (переходную) вошли профессии, риск травматизма которых лежит в диапазоне между среднеголетним заводским и среднеотраслевым риском: 0024 (электрогазосварщик), 0020 (слесарь-ремонтник); 0022 (газорезчик) и 0012 (слесарь-ремонтник).

Третья группа менее травмоопасна, в неё вошли профессии: 0016, 004, 0019, 0013, 002, 006, 0010, 0025. Их уровень травматизма ниже среднеголетнего и среднеотраслевого показателей.

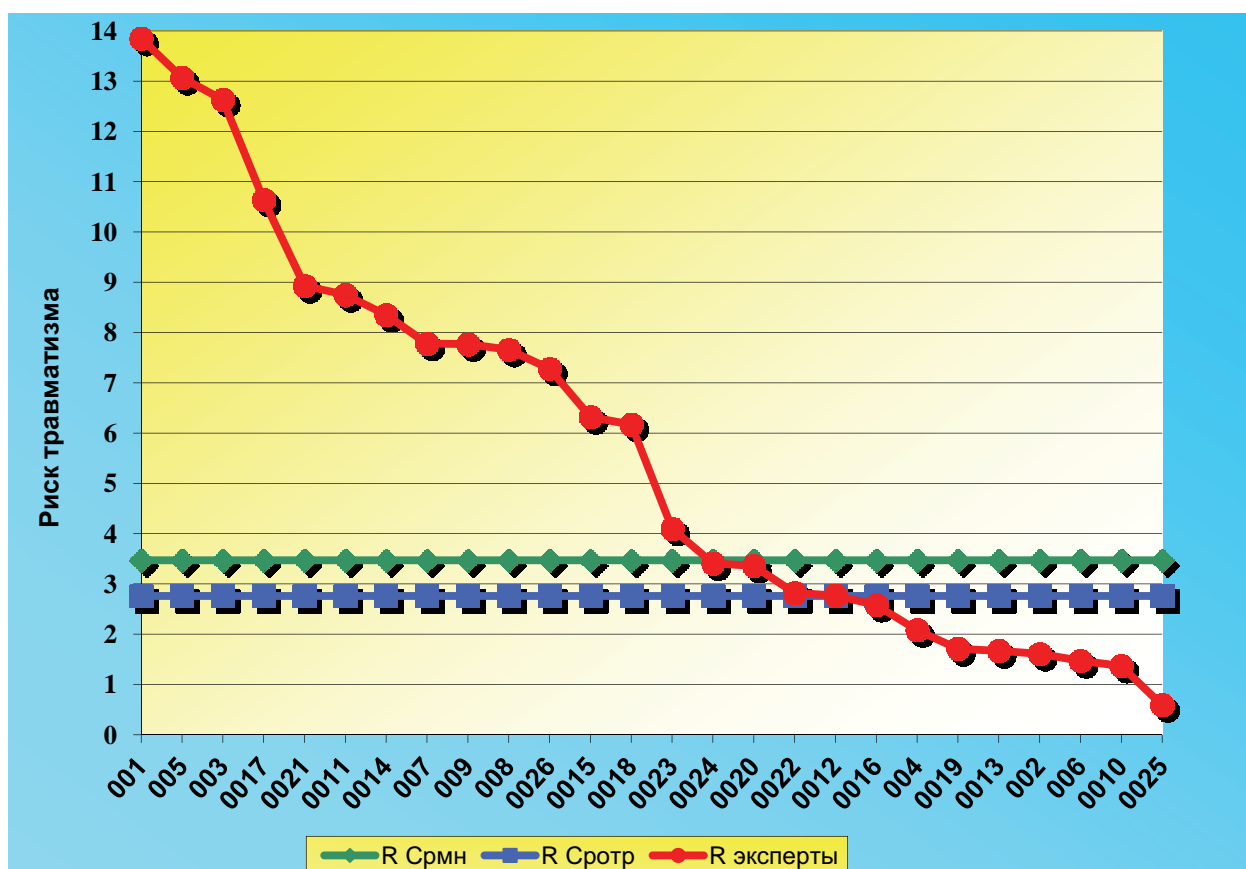


Рис. 8. Выделение групп риска персонала бригады № 1 участка переработки лома ПЛЦ ОАО «Амурметалл»



При анализе оценок, полученных от экспертов, часто возникает необходимость выявить конкордацию – согласованность их мнений по нескольким факторам, оказывающим влияние на один конечный результат (качество). Для оценки согласованности мнений экспертов нами рассчитан коэффициент конкордации (коэффициент согласия) по формуле, предложенной Кендаллом [13]. Коэффициент конкордации может меняться от 0 до 1, причем его равенство единице означает, что все эксперты дали одинаковые оценки, а равенство нулю означает, что связи между оценками, полученными от разных экспертов, не существует. Расчеты показали, что коэффициент конкордации для всей совокупности факторов ( $n = 4$ ) равен 0,6. Таким образом, коэффициент конкордации располагается в области положительных значений, отличных от нуля. Это свидетельствует о наличии приемлемой согласованности мнений экспертов.

Для выявленных групп персонала с повышенным риском травматизма в бригаде № 1 участка переработки лома ЦПЛ необходимо разработать и реализовать специальную усиленную программу профилактики травматизма. Подобные адресные мероприятия всегда дадут более заметный результат, чем их применение ко всем сразу, кроме того, позволят минимизировать затрачиваемые на подобные программы ресурсы.

При разработке комплекса мероприятий необходимо использовать данные анализа травматизма по причинам его возникновения. В России принято выделять нижеследующие причины производственного травматизма [15]:

1. Организационные – отсутствие или неудовлетворительное проведение инструктажа и обучения безопасным методам ведения работ; руководства и надзора за работой; неудовлетворительный режим труда и отдыха; неправильная организация рабочего места, движение пешеходов и транспорта; отсутствие, неисправность или несоответствие условиям работы спецодежды, индивидуальных средств защиты и др.

2. Технические причины подразделяются на три вида:

а) конструкторские – несоответствие строительных конструкций, технологического оборудования, транспортных и энергетических устройств требованиям безопасности; несовершенство конструкций монтажной оснастки, ручного и переносного механизированного инструмента; отсутствие или несовершенство оградительных предохранителей и других технических средств безопасности;

б) технологические – неправильный выбор оборудования, оснастки грузоподъемных механизмов и средств механизации; нарушение технологического процесса;

в) неудовлетворительное техническое обслуживание – отсутствие плановых профилактических осмотров, технических уходов и ремонта оборудования, оснастки и транспортных средств; неисправность ручного и механизированного инструмента.

3. Неудовлетворительное состояние производственной среды – неблагоприятные метеорологические условия; неудовлетворительная освещенность; повышенный уровень шума и вибрации; повышенная концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны; наличие вредных облучений и др.

4. Психофизиологические – несоответствие анатоморфологических и психологических особенностей организма условиям труда; неудовлетворительный психологический климат в коллективе; алкогольное опьянение и др.

Безопасность труда обеспечивается соблюдением требований нормативно-технической документации, ССБТ, инструкций по охране труда. Чтобы исключить случаи травм в процессе труда, должно быть правильно организовано рабочее место (ГОСТ 12.2.061), а используемое оборудование должно соответствовать требованиям безопасности (ГОСТ 12.2.003) и общим эргономическим требованиям (ГОСТ 12.2.049) [9; 10; 11]. Обеспечение требований охраны труда в организации регулируется системой управления охраной труда (ГОСТ 12.0.230) [12].

Наиболее общими мероприятиями, направленными на снижение производственного травматизма, являются: рациональное устройство основных и вспомогательных производст-

Степанова И.П., Осколова И.Д.

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАВМАТИЗМА НА ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»

МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

венных зданий и сооружений; рациональное устройство машин, станков, приборов, инструмента, приспособлений и другого оборудования, их размещение и содержание в исправном состоянии; рациональная организация рабочих мест; изоляция вредного производственного процесса; улучшение технологии производства; механизация; автоматизация; защита работающих; организационно-массовые мероприятия.

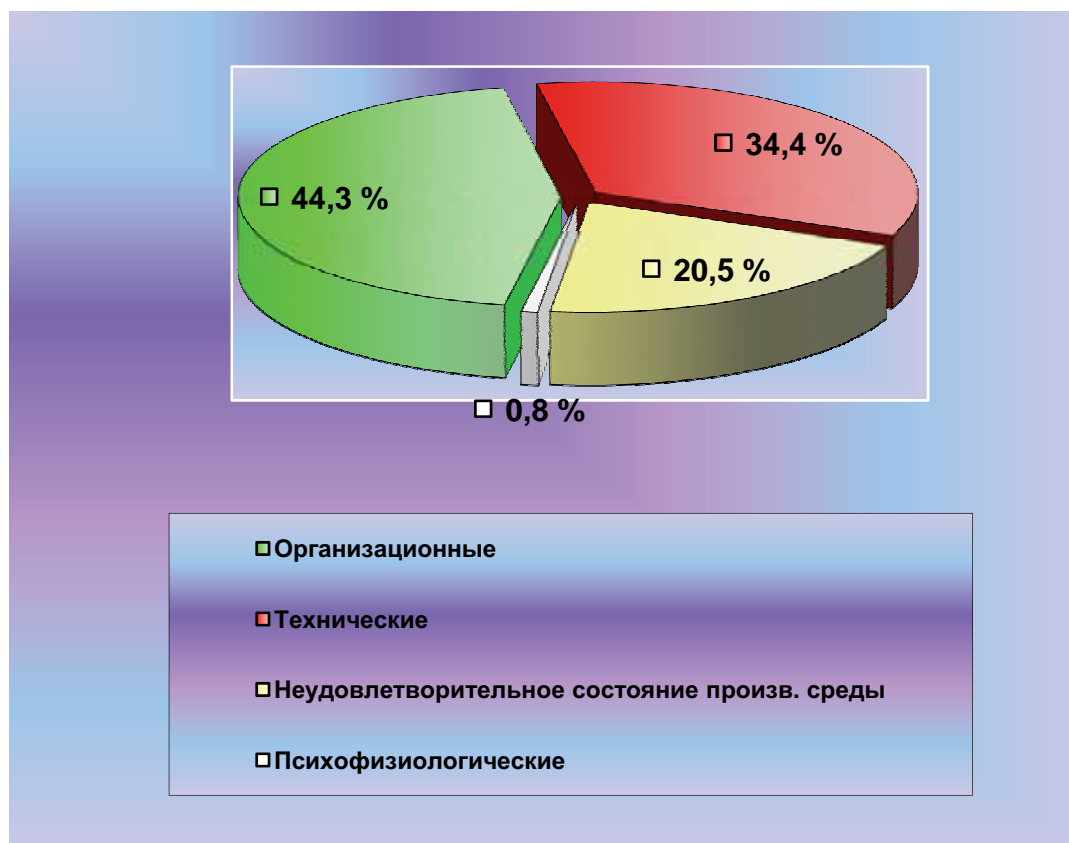


Рис. 9. Зависимость травматизма от причин его возникновения на ОАО «Амурметалл» за период с 1999 по 2008 гг.

Эти мероприятия способствуют предотвращению травматизма за счет исключения поломок и аварий. При рациональном размещении машин, станков и другого оборудования предусматриваются проезды, проходы, площадки для хранения материалов, заготовок и изделий, обеспечивающие удобство и безопасность маневрирования производственного транспорта и передвижения людей.

Рациональное устройство основных и вспомогательных сооружений, зданий и т.п. предусматривает обеспечение требований: к объемам и площадям, к вентиляции, отоплению, водоснабжению, производственному освещению, микроклимату, пожарной безопасности и др. Требования, условия и нормы по указанным мероприятиям содержатся в государственных стандартах, строительных нормах и правилах, санитарных нормах и в ряде других нормативно-технических документах. С учетом специфики работы в различных отраслях разрабатываются отраслевые и другие документы.

Для предупреждения и предотвращения производственного травматизма необходимо неукоснительное соблюдение правил по безопасности труда при проведении работ, соблюдение трудовой дисциплины, выполнение требований безопасности к оборудованию, оснастке и инструменту.

Важнейшие профилактические меры по предотвращению производственного травматизма – обучение работников требованиям охраны труда, безопасным приемам работы, стро-



гому соблюдению трудовой дисциплины, технологических инструкций и инструкций по охране труда, правильному использованию средств индивидуальной защиты, оказанию первой помощи пострадавшему – входят в каждодневный минимум организации охраны труда и реально снижают производственный травматизм [16].

На рис. 9 представлена диаграмма анализа причин производственного травматизма для исследуемого объекта.

Анализ причин производственного травматизма показал, что большинство несчастных случаев происходит из-за неудовлетворительного содержания и недостатка в организации рабочих мест. Также был проведен анализ факторов производственного травматизма, на основе которого было выявлено, что наиболее опасным производственным фактором является воздействие движущихся, вращающихся механизмов и разлетающихся деталей.

Наибольшее количество несчастных случаев происходит по организационным причинам – 44,3 %. На втором месте – технические причины (конструкторские, технологические) – 34,4 %. На третьем месте – неудовлетворительное состояние производственной среды (повышенная концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны, повышенная температура воздуха и тепловое излучение) – 20,5 %. На четвертом месте – психофизиологическая причина (неблагоприятный психологический климат в коллективе) – 0,8 %.

На сегодняшний день проблема травматизма на предприятии очень остра. В металлургических цехах наиболее опасными в отношении травматизма являются производственные участки, расположенные в непосредственной близости от основных агрегатов. Всякое нарушение технологического режима сопряжено с прорывом, выбросом или выплесками расплавленного металла, шлака, раскаленных шихтовых материалов, окалины и т.д. Поэтому производственные площадки вокруг металлургических агрегатов представляют опасную зону, работа в которой требует соблюдения повышенных мер безопасности. Опасная зона для каждого металлургического агрегата различна и зависит от его размеров, технологических, конструктивных особенностей и интенсивности работы. Площадь опасной зоны агрегата устанавливается заводскими инструкциями по охране труда; она должна быть наглядно обозначена и ограждена. Травмы нередко возникают из-за отсутствия или плохого состояния ограждающей техники.

Способствуют увеличению травматизма захламленность и беспорядок в рабочих помещениях, недостаточное и нерациональное освещение, неудовлетворительное санитарное состояние, низкая культура труда.

Отсутствие инструктажа рабочих или плохо организованное обучение их безопасным методом и приемом работы и слабое ознакомление с правилами по охране труда также способствуют увеличению травматизма.

Одной из причин травматизма работников являются неудовлетворительные условия труда. На предприятии функционируют участки и даже цеха, где шум, вибрация, микроклимат, тепловое излучение, содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны превышают предельно допустимые уровни и концентрации.

В результате работники теряют самое дорогое – здоровье, а предприятие и государство несут огромные экономические потери.

В качестве дополнительных мероприятий по профилактике травматизма могут быть предложены:

- жесткий отбор на рабочие места, входящие в группу с повышенной травмоопасностью с учетом уровня профессиональной подготовленности, уровня здоровья, наличия склонностей к вредным привычкам, отношения к ведению здорового образа жизни, с учетом психологического типа личности;
- поэтапное (пошаговое) освоение трудовых обязанностей на новом рабочем месте;
- мотивация работника на безопасное ведение работ (например, за рубежом это достигается высокой оплатой труда на травмоопасных операциях с угрозой утраты этой работы в случае нарушения правил безопасного ведения работ);

**Степанова И.П., Осколова И.Д.**

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАВМАТИЗМА НА ОАО «АМУРМЕТАЛЛ»**

**МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

- положительное стимулирование безопасного ведения работ;  
- ограничение срока контракта на опасных и вредных работах временем наступления физиологического отказа организма (также широко практикуется за рубежом);  
- обучение не только правилам безопасности, но и технологиям ведения здорового образа жизни, позволяющего повысить устойчивость организма и более успешно (безопасно) действовать в предложенных условиях.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Киямова, Н. П. Итоги работы ОАО «Амурметалл» в 2008 году / Н. П. Киямова // За сталь. – 2009. – 23 января. – № 1.
2. Асташова, Е. Главный рубеж – два миллиона тонн стали / Е. Асташова // За сталь. – 2008. – 18 июля. – № 28.
3. Санкт-Петербургский научно-Исследовательский институт по охране труда [Электронный ресурс] / Статьи по охране труда: 25.12.2009. С. А. Мажженов – Показатели учета несчастных случаев, используемые в международной практике. – Режим доступа: <http://www.niiot.ru/article/article24.htm>, свободный.
4. Охрана труда в Российской Федерации: правовое регулирование [Электронный ресурс] / Правовые акты: 25.11.2007; ред. Ю. Л. Фадеев. – Режим доступа: <http://www.niiot.ru/article/doc/docs.htm>, свободный.
5. Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: федер. закон РФ от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ.
6. О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: федер. закон РФ от 22 дек. 2005 г. № 179-ФЗ.
7. Об утверждении средних значений основных показателей для расчета скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Постановление ФСС РФ от 29 марта 2002 г. № 35.
8. Об утверждении средних значений основных показателей для расчета скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Постановления ФСС РФ от 31 марта 2003 г. № 36; от 1 апреля 2004 г. № 31; от 27 апреля 2005 г. № 46; от 31 марта 2006 г. № 38; от 20 марта 2007 г. № 60; от 2 апреля 2008 г. № 76; от 30 марта 2009 г. № 77.
9. Об утверждении методик расчета скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Постановление ФСС РФ от 5 февр. 2002 г. № 11 // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 3284.
10. Об утверждении классификации видов экономической деятельности по классам профессионального риска: Приказ ФСС от 18 дек. 2006 г. № 857.
11. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ.
12. Степанова, И. П. Методы прогнозирования травматизма на основе анализа произошедших событий: индивидуальный и групповой риск / И. П. Степанова // Материалы 9-й междунар. науч.-практ. конф. в области экологии и безопасности «ДВ весна-2009». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2009. – 17 с.
13. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – 1980. – 263 с.
14. Орлов, А. И. Теория принятия решений: учеб. пособие / А. И. Орлов. – М.: Март, 2004. – 656 с.
15. Воронова, В. В. Е-302 Медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности: учеб. пособие / В. В. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 175 с.
16. Дубровский, Н. Снизить производственный травматизм возможно / Н. Дубровский // Охрана труда и социальное страхование. – 2008. – № 7. – С. 65-69.
17. Олдендерфер, М. С. Кластерный анализ / М. С. Олдендерфер, Р. К. Блешфилд // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. – М., 1989. – С. 139-210.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ  
CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

**Дмитриев Э. А., Ри Д. Х.**  
**E.A.Dmitriev, D.H.Ree**

**ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОГО ФОРУМА «ОТ НАУКИ К БИЗНЕСУ»  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ  
С НАУКОЕМКИМ БИЗНЕСОМ»**

**RESULTS OF THE 5TH INTERNATIONAL FORUM “FROM SCIENCE TO BUSINESS”:  
MODERN APPROACHES TO INTERACTION BETWEEN THE HIGH SCHOOL AND  
SCIENCE INTENSIVE BUSINESS**

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, проректор по инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [innov@knastu.ru](mailto:innov@knastu.ru).

**Mr.Eduard A.Dmitriev** – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Innovation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [innov@knastu.ru](mailto:innov@knastu.ru)

**Ри Дмитрий Хосенович** – кандидат экономических наук, доцент, директор Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr.Dmitry H.Ree** – PhD in Economics, Associate Professor, Director, Research&Technology

**Аннотация.** Приводятся итоги международного форума, состоявшегося в г. Санкт-Петербурге с 11 по 13 мая 2011 г., и решения, принятые по итогам форума.

**Summary.** Results of the International Forum held in St.Petersburg on May 11 - 13, 2011, decisions taken following the results of the Forum.

С 11 по 13 мая 2011 г. в г. Санкт-Петербурге прошел пятый международный форум «От Науки к бизнесу». Организаторами форума выступили Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики (СПбГУ ИТМО), компания «Экспофорум», компания «Мономакс», Всероссийский научно-практический журнал «Инновации», некоммерческое партнерство «Руссофт», администрация Томской области.

На форуме приняли участие 206 очных и 56 заочных участников, которые представляли 70 городов из 10 стран. Страны: Беларусь, Германия, Испания, Казахстан, Литва, Россия, США, Таджикистан, Украина и Финляндия.

В рамках форума проводились круглые столы по обмену опытом коммерциализации научных разработок. Особый интерес вызвали доклады участников форума из США, Финляндии и Германии, которые подробно представили модели поддержки и развития инноваций в своих государствах. Вузы развитых стран представляют собой заведения, в которых главным образом происходит генерация и распространение знаний. Обучение же студентов происходит именно в процессе генерации знаний. В процессе решения реальных нетривиальных задач.

В ходе дискуссий так же отмечалось, что за последний год правительством России предприняты значительные реальные шаги по поддержке инноваций. Отмечались серьезные успехи в области инноваций вузов таких городов, как Новосибирск и Томск. Так, например, суммарный оборот за 2010 г. малых инновационных предприятий, работающих в академгородке г. Новосибирска, составил более пяти млрд р. При ТУСУР (г. Томск) создано свыше

**Дмитриев Э.А., Ри Д.Х.**

**ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОГО ФОРУМА «ОТ НАУКИ К БИЗНЕСУ» «СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ С НАУКОЕМКИМ БИЗНЕСОМ»**

123 малых инновационных предприятий. Во всех предприятиях трудятся и получают заработную плату сотрудники университета.

По окончании форума участниками были подготовлены пять рекомендаций Правительству РФ, Государственной думе и Совету Федерации по улучшению инновационного климата в стране.

**Рекомендации в области налогового регулирования и социального страхования**

Повышение страховых взносов с 26 до 34 % для предприятий всех форм собственности, предпринятое государством в разгар мирового финансового кризиса с целью повышения наполнения страхового и пенсионного фондов, в наибольшей степени воздействует на высокотехнологичные секторы экономики, поскольку в их расходах наибольшую долю составляют расходы на заработную плату. Самый большой рост нагрузки по страховым взносам пришёлся на малые производственные предприятия, действующие по упрощённой системе налогообложения (с 14 до 26 %). В результате конкурентоспособность инновационного сектора экономики ещё более снижается (уровень затрат возрастает на 6-10 %), что находится в противоречии с мировой практикой, согласно которой в период кризиса государство в первую очередь оказывает поддержку занятости высокотехнологичному малому бизнесу, предоставляя ему налоговые льготы.

В этой связи участники Форума рекомендуют:

1) при сохранении регрессивной шкалы страховых взносов на уровне 465 тыс. р. в 2012 г.:

- восстановить ставку страховых взносов, выплачиваемых производственными предприятиями малого бизнеса с упрощённой системой налогообложения, на уровне 14 % от ФОП;
- установить ставку страховых взносов для иных производственных предприятий на уровне 14 %;

2) в случае повышения регрессивной шкалы страховых взносов установить законодательно, что суммарный объём страховых взносов в производственных предприятиях не должен превышать 10 % от оборота компании.

**В области косвенного налогообложения**

В настоящее время выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ за счёт средств бюджетов, а также средств Российского фонда фундаментальных исследований, Российского фонда технологического развития и образуемых для этих целей в соответствии с законодательством Российской Федерации внебюджетных фондов министерств, ведомств, ассоциаций; выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ учреждениями образования и научными организациями на основе хозяйственных договоров не облагается НДС.

На практике это означает, что все суммы «входного» НДС относятся на себестоимость НИОКР, что оказывает существенное влияние на стоимость проводимых исследований.

Тем не менее, предусмотрена возможность отказа от использования освобождения.

Рекомендации: (А) – исключить данные положения (поскольку в действующем варианте они оказывают противоположное влияние и создают дополнительные трудности для компаний, желающих их не применять), (Б) – установить заявительный порядок их примене-



ния либо (В) – установить для данных операций ставку 0 % НДС (аналогично ставкам для международных перевозчиков, «золотого нуля» и пр.).

## **В области таможенного регулирования**

Участники Форума подтверждают, что важным барьером на пути развития инновационных решений является ограничение ввоза в страну высокотехнологичного оборудования (производственного и научно-исследовательского характера), которое не производится в РФ или не имеет коммерческой ценности ввиду того, что оно не продаётся на рынке, а используется для отработки своего функционала или для тестирования.

В этой связи участники Форума рекомендуют упростить порядок ввоза такого оборудования на таможенную территорию РФ, устранив взимание ввозных таможенных пошлин и уплату НДС на ввоз такого оборудования.

## **В области венчурного финансирования**

Участники Форума констатируют, что существующее законодательство, регулирующее функционирование венчурных фондов в РФ, не соответствует мировой практике и является серьёзным барьером на пути привлечения капитала в высокотехнологичные и высоко рискованные проекты.

В этой связи участники Форума поддерживают инициативу Российской венчурной компании по внесению изменений в действующее законодательство, регулирующее деятельность венчурных фондов, вносящее соответствие его международной практике.

## **В области государственной поддержки высокотехнологичного экспорта**

Участники Форума выражают сожаление в связи с недостаточным развитием в РФ инструментов государственной поддержки высокотехнологичного экспорта. Существующие инструменты предоставления государственных гарантий и страхования экспортных кредитов практически недоступны малому частному инновационному бизнесу, а создаваемые Минэкономразвития региональные инструменты субсидирования поддержки экспорта имеют конкурсный характер и не предусматривают поддержки коллективных маркетинговых и пиар-акций российских экспортеров.

В этой связи участники Форума рекомендуют использовать международный опыт и создать специализированный инструмент поддержки высокотехнологичного экспорта в форме Ассоциации с участием государства и частного бизнеса либо в форме саморегулируемой организации, имеющей бюджет, необходимый для субсидирования внешнеэкономической деятельности аккредитованных компаний на основе заявительного порядка компенсации понесённых расходов (по овладению иностранными языками, навыками маркетинга и продаж, по участию в международных мероприятиях и проведению пиар-акций, по использованию услуг по защите прав интеллектуальной собственности и иных услуг, необходимых для защиты российского бизнеса на чужих рынках).