

М. Б. Гузаиров, Е. А. Муравьева, К. А. Соловьев

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ПАРОВОЙ ВИНТОВОЙ МАШИНЫ

Предложена компьютерная модель функции выходной мощности паровой винтовой машины (ПВМ), используемой в системе энергосбережения для преобразования энергии излишнего давления пара котельных промышленных предприятий в электрическую мощность. Позволяет по техническим характеристикам используемого пара (коэффициент расширения, давление на входе и выходе ПВМ, температура на входе, расход пара) с погрешностью не более 1% определить установочную мощность ПВМ, конкретные технологические условия, при которых она вырабатывает максимальную мощность, а также диаметр и длину роторов соответствующие этой мощности. *Паровая винтовая машина; компьютерная модель ПВМ; коэффициент расширения пара; диаметр и длина роторов ПВМ; концептуальная модель ПВМ; i-s диаграмма; технологии энергосбережения*

В настоящее время в России и в мире получают все большее распространение новые технологии энергосбережения. К ним, в частности, относится использование неостребованной основным производством предприятия энергии пара для выработки дополнительных объемов электроэнергии с помощью паровых винтовых машин (ПВМ) [1, 2].

Масштабы применения такой технологии энергосбережения достаточно велики. Например, в России находятся в эксплуатации около 80 000 паровых котельных с паропроизводительностью 10–100 т/ч [1]. Обычно они используются в производственно-отопительных целях и принадлежат небольшим предприятиям бумажной, лесопильной, пищевой, мясомолочной, кондитерской, строительных материалов, текстильной, кожевенной и многих других отраслей промышленности, в которых за счет более рационального использования пара можно получить 200–1500 кВт электрической мощности [1]. Использование лопаточной паровой турбины в данной технологии энергосбережения малопродуктивно, поскольку в области небольших мощностей она имеет ряд известных недостатков [2].

Наиболее привлекательными по совокупности свойств в данном диапазоне мощности являются ПВМ, которые, по сути, являются новым типом парового двигателя, разработанного в России. На конструкцию ПВМ, ее узлов и систем получено свыше 20 патентов в России и за рубежом [2, 3]. В упомянутом диапазоне мощностей ПВМ практически по всем показателям значительно превосходит обычные лопаточные паровые турбины.

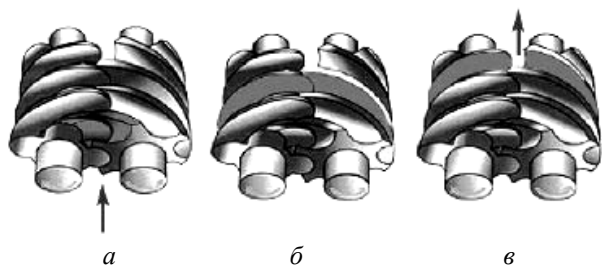
ПВМ является машиной объемного типа действия. Она содержит ведущий и ведомый

роторы (рис. 1) в виде шнеков специального профиля. Выходной вал ведущего ротора подсоединен к электрогенератору. Роторы находятся в зацеплении и имеют шестерни связи, включающие взаимное касание роторов во время работы.



Рис. 1. Конструкция роторов ПВМ

Принцип действия ПВМ поясняется на рис. 2. Пар высокого давления из котла поступает в ПВМ через впускное окно в корпусе с одного торца роторов. После заполнения паром канавки между зубьями происходит отсечка пара, и при дальнейшем вращении роторов в канавке (парной полости) происходит объемное расширение порции пара. В конце расширения канавка сообщается с выпускными окнами в корпусе на другом торце роторов. Выпускной пар поступает в тепловую сеть для нужд технологии, например, для выпарки сахара из свеклы или отопления.



**Рис. 2.** Принцип действия ПВМ:  
 а – начальное заполнение паровой полости;  
 б – расширение пара; в – выпуск отработанного пара

Не смотря на простоту конструкции, ПВМ является машиной с существенно нелинейными характеристиками, в которой не представляется возможным аналитически выразить зависимость выходной мощности от ее геометрических и режимных параметров.

Поэтому при проектировании ПВМ для конкретных производственных условий конструктор сталкивается со сложной задачей определения ее геометрических размеров и установленной мощности, при которых ПВМ выдает максимальную мощность в технологических условиях конкретной котельной.

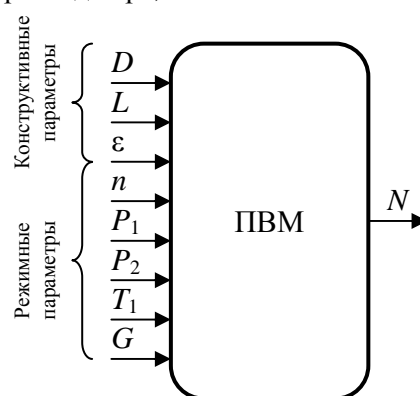
Особенность предлагаемой схемы энергосбережения заключается и в том, что параметры производимого пара в разных котельных существенно различаются и зависят от целей использования пара на конкретном предприятии. К тому же, производство собственной электроэнергии в котельной является полезным, но побочным энергосберегающим процессом. Поэтому использование ПВМ не должно нарушить режима работы основного производства, использующего пар с заданными параметрами для своих технологических нужд.

Для определения условий получения максимальной мощности, вырабатываемой ПВМ в заданных технологических условиях, построены концептуальная модель ПВМ (рис. 3) и компьютерная модель функции мощности, генерируемой ПВМ, от ее геометрических и режимных параметров (рис. 4).

На рис. 3 введены следующие обозначения для входных параметров ПВМ:

- $D$  и  $L$  – диаметр и длина роторов соответственно, мм;
- $\varepsilon$  – коэффициент расширения пара в ПВМ;
- $n$  – частота вращения выходного ротора ПВМ, об/мин;
- $P_1, P_2$  – давление пара соответственно на входе и выходе ПВМ, ата;
- $T_1$  – температура пара на входе ПВМ, °С;

$G$  – расход пара, кг/с.



**Рис. 3.** Концептуальная модель ПВМ

Выходным параметром концептуальной модели ПВМ является вырабатываемая ею мощность ( $N$ , кВт).

Сложность построения модели возникает из-за нелинейных зависимостей параметров пара, вырабатываемой ПВМ, которые не имеют аналитического описания и получены экспериментально [2, 4] в виде совокупности расчетных процедур. Основные данные о ПВМ сведены в таблицы, отображающие зависимость температуры, давления, удельного объема, энтальпии и энтропии воды и водяного пара, по которым построена так называемая  $i$ - $s$ -диаграмма ( $h$ - $s$ -диаграмма) [4]. Кроме того, качество сборки машины вносит поправки на утечки пара сквозь зазоры, которые зависят также и от режимных параметров.

Для описания алгоритма функционирования компьютерной модели функции выходной мощности ПВМ, представленной на рис. 4, введены следующие обозначения:

- $i_1$  – энтальпия пара на входе ПВМ;
- $i_{2ад}$  – энтальпия при идеальной адиабатическом процессе расширения;
- $v_1$  – удельный объем на входе ПВМ;
- $s_1$  – энтропия пара на входе ПВМ.

Удельный объем на выходе определяется через коэффициент расширения [4]:

$$v_1 = v_2 \cdot \varepsilon.$$

Расчет теоретического расхода пара ( $G_T$ ) и утечек ( $G_{ут}$ ) пара в ПВМ произведен по следующим формулам [1]:

$$G_T = \frac{4V_h n}{60v_1 \varepsilon};$$

$$G_{ут} = G - G_T,$$

где  $V_h = 0,1144D^2L$  – рабочий объем ПВМ;  $G$  – текущее значение расхода пара, проходящего через ПВМ.

Мощность ПВМ определялась по формуле [1, 4]:

$$N = \eta G(i_1 - i_2),$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД) паровой винтовой машины;  $i_2 = i_1 - (i_1 - i_{2\text{ад}})\eta_{\text{ад}}$  – энтальпия пара на выходе ПВМ с КПД адиабатического расширения  $\eta_{\text{ад}}$ .



Рис. 4. Алгоритм функционирования компьютерной модели функции выходной мощности ПВМ

Сущность предлагаемого компьютерного метода определения параметров, при которых ПВМ в конкретных технологических условиях вырабатывает максимальную мощность, заключается в следующем: поочередно фиксируется семь входных параметров ПВМ на середине их диапазона изменения [1] и снимается зависимость выходной мощности ПВМ от восьмого

параметра. По полученным графикам, используя параметры пара конкретной котельной (коэффициент расширения пара ( $\varepsilon$ ), давление пара на входе и выходе ( $P_1, P_2$ ), температура пара на входе ПВМ ( $T_1$ ) и расход пара ( $G$ )), определяется значение выходной мощности ПВМ для каждого из перечисленных параметров. Затем определяется их среднее значение и по нему, используя графики функций  $N = f(D)$  и  $N = f(L)$ , определяются значения диаметра и длины роторов ПВМ, соответствующие максимуму ее выходной установочной мощности в заданных технологических условиях.

При определении параметров ПВМ учитывались следующие ограничения, наложенные технологией изготовления ПВМ [1, 2, 4]:

$$D = \{80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800\}; \quad (1)$$

$$1,5 \leq \varepsilon \leq 5,5; \quad L/D = \{0,9; 1,0; 1,35; 1,5\}$$

Компьютерная модель функции выходной мощности ПВМ разработана в пакете Matcad и представляет собой систему автоматизации известной «ручной» процедуры расчета выходной мощности ПВМ от ее входных параметров с погрешностью не более 1 % [2]. Поэтому сохранить такую же погрешность в предлагаемой модели не составило большого труда [5].

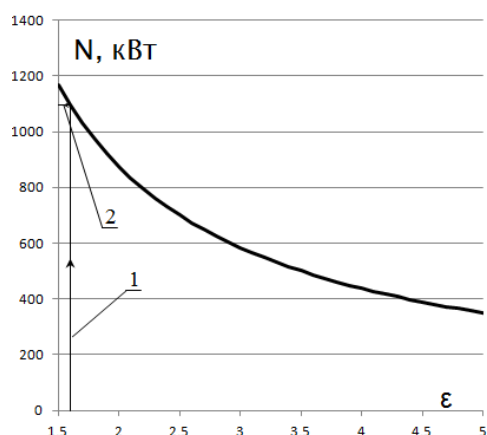
В результате компьютерного эксперимента были получены графики, показывающие зависимость выходной мощности ( $N$ ) ПВМ от  $\varepsilon, P_1, P_2, G, D$  и  $L$  (рис. 5–11 соответственно). Проанализируем их.

Из рис. 5 следует, что ПВМ вырабатывает максимальную мощность  $N$  при коэффициенте расширения пара  $\varepsilon = 1,5$ . С увеличением  $\varepsilon$  мощность ПВМ асимптотически приближается к значению 290 кВт и не зависит от  $\varepsilon$ . Поэтому для получения от ПВМ максимальной мощности необходимо задавать минимально возможный для конкретных технологических условий коэффициент расширения пара.

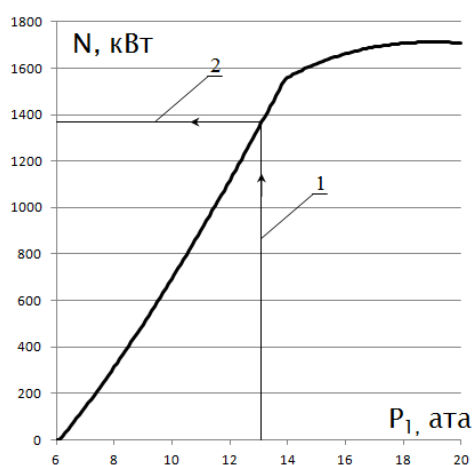
Увеличение давления  $P_1$  на входе ПВМ почти пропорционально увеличивает ее мощность (рис. 6). Однако при  $P_1 > 14$  ата такое увеличение  $N$  резко уменьшается, а при  $P_1 > 20$  ата имеет место незначительное снижение выходной мощности ПВМ при увеличении  $P_1$ . Таким образом, эффективно увеличивать мощность ПВМ за счет увеличения давления на входе только до  $P_1 = 14$  ата.

Выходная мощность ПВМ уменьшается при увеличении давления пара  $P_2$  на ее выходе (рис. 7) и становится равной нулю при  $P_2 > 13,2$  ата, т. е. для получения большей выход-

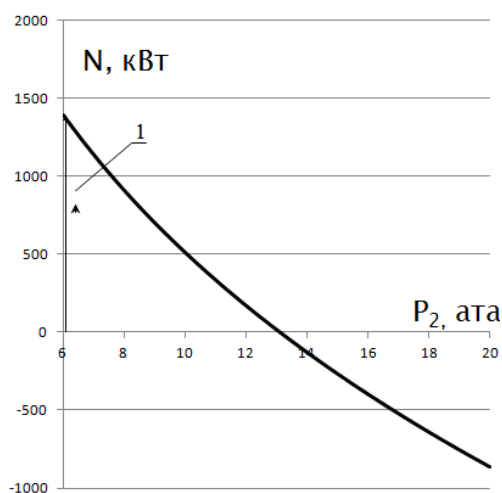
ной мощности в ПВМ давление пара на ее выходе должно иметь минимально возможное значение.



**Рис. 5.** Выходная мощность ПВМ как функция от коэффициента расширения пара

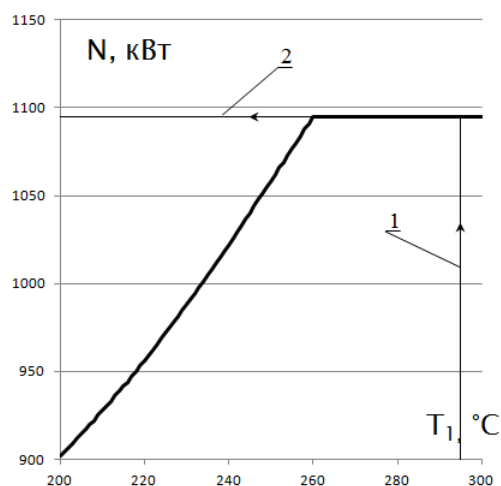


**Рис. 6.** Зависимость выходной мощности ПВМ от давления пара на входе



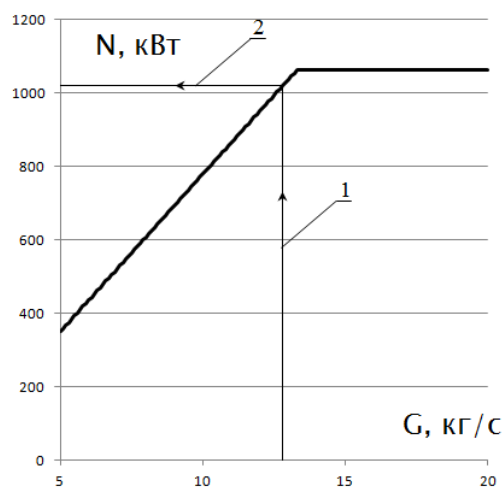
**Рис. 7.** Влияние давления пара на выходе ПВМ на ее выходную мощность

В диапазоне (200–260) °С мощность на выходе ПВМ растет пропорционально температуре пара  $T_1$  на ее входе (рис. 8), а при  $T_1 > 260$  °С выходная мощность ПВМ остается постоянной при увеличении  $T_1$ . Отсюда следует, что для получения от ПВМ максимальной мощности необходимо температуру пара на ее входе поддерживать в окрестностях точки с температурой 260 °С.



**Рис. 8.** Функция выходной мощности ПВМ от температуры пара на входе

Увеличение расхода пара  $G$  на входе ПВМ приводит к увеличению ее выходной мощности при  $G \leq 13,2$  кг/с (рис. 9). При дальнейшем увеличении  $G$  мощность ПВМ остается неизменной. Поэтому для получения максимальной выходной мощности ПВМ расход пара на ее выходе должен равняться 13,2 кг/с.



**Рис. 9.** Зависимость выходной мощности ПВМ от расхода пара

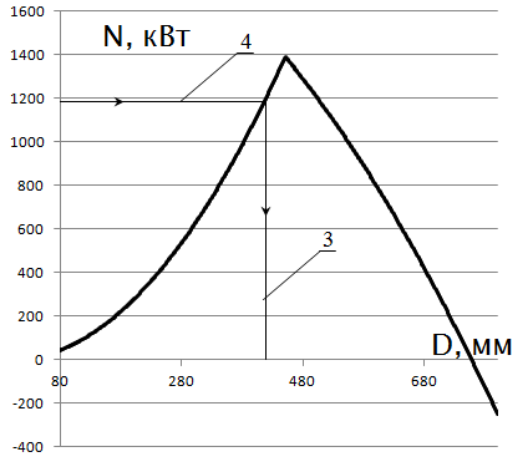


Рис. 10. Выходная мощность ПВМ как функция от диаметра роторов

Согласно рис. 10, ПВМ выдает максимум мощности при  $D = 420$  мм. Причем при  $D < 420$  мм увеличение диаметра роторов увеличивает, а при  $D > 420$  мм – уменьшает ее выходную мощность. По этой причине в ПВМ следует выбирать  $D < 420$  мм.

Зависимость мощности ПВМ от длины ее роторов при  $L \leq 730$  мм носит линейный характер (рис. 11). Именно в этой области следует выбирать длину ее роторов, поскольку дальнейшее увеличение  $L$  не имеет смысла, из-за того, что это не приводит к увеличению мощности ПВМ.

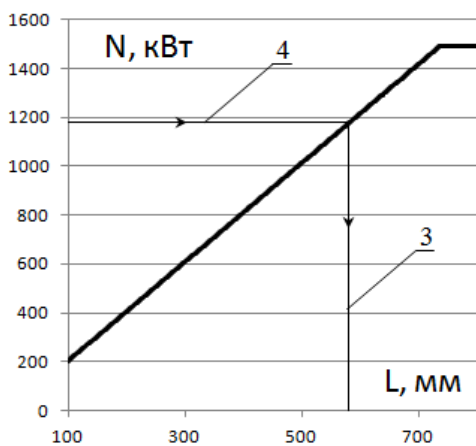


Рис. 11. Влияние длины роторов ПВМ на ее выходную мощность

Как следует из рис. 12, выходная мощность ПВМ пропорциональна скорости вращения ее выходного ротора, который механически связан с валом электрического генератора. Поскольку скорость вращения ротора генератора жестко связана с промышленной частотой электрической сети, к которой подключены его обмотки

статора, то скорость вращения выходного ротора ПВМ практически не влияет на выбор установочной мощности ПВМ.

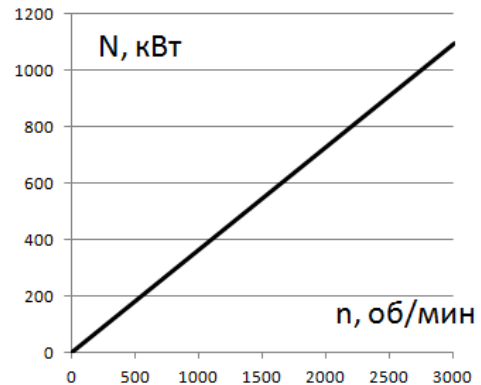


Рис.12. Взаимосвязь выходной мощности ПВМ и скорости вращения ее роторов

В качестве примера использования результатов компьютерного моделирования выходной мощности ПВМ произведен выбор диаметра и длины роторов ПВМ с коэффициентом расширения пара  $\epsilon = 1,6$  и частотой вращения выходного вала  $n = 3008$  об/мин, установленной на ТЭЦ-4 в г. Уфе. На эту ПВМ подается пар со следующими техническими характеристиками:

- давление на входе  $P_1=13,1$  ата;
- давление на выходе  $P_2=6,1$  ата;
- температура на входе  $T_1=295^\circ\text{C}$ ;
- расход пара  $G=12,78$  кг/с.

Числовые значения  $\epsilon$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $T_1$  и  $G$  отложены на горизонтальных осях графиков, изображенных на рис. 5–9 соответственно. По ним с помощью перпендикуляров 1 и 2 с указателями перемещения (стрелками) получено значение выходной мощности ПВМ в киловаттах, соответствующей заданным параметрам пара, подаваемого на ее вход. В результате получена следующая система соотношений:

$$\begin{aligned} \epsilon = 1,6 &\rightarrow N_\epsilon = 1093,62 \text{ (рис. 5);} \\ P_1 = 13,1 \text{ ата} &\rightarrow N_{P_1} = 1362,67 \text{ (рис. 6);} \\ P_2 = 6,1 \text{ ата} &\rightarrow N_{P_2} = 1338,23 \text{ (рис. 7);} \\ T_1 = 295^\circ\text{C} &\rightarrow N_{T_1} = 1097,37 \text{ (рис. 8);} \\ G = 12,78 \text{ кг/с} &\rightarrow N_G = 1018,18 \text{ (рис. 9).} \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку для выбора диаметра и длины роторов ПВМ требуется одно значение ее выходной мощности, то необходимо, используя данные из (2), найти среднее арифметическое от полученных мощностей по формуле:

$$N_{\text{ср}} = (N_\epsilon + N_{P_1} + N_{P_2} + N_{T_1} + N_G)/5 = 1182,01 \text{ кВт.} \quad (3)$$

По  $N_{\text{ср}}$  из (3) с помощью перпендикуляров 3 и 4 найдены теоретические значения диаметра  $D_{\text{теор}} = 418,73$  мм (рис. 10) и длины  $L_{\text{теор}} = 580,46$  мм (рис. 11) роторов ПВМ для ТЭЦ-4 в г. Уфе. С учетом ограничений (1) ближайшим стандартным значением  $D$  является 400 мм. Отсюда длина ПВМ при  $L/D = 1,35$  будет равняться 540 мм. Такие же значения имеют диаметр и длина роторов ПВМ, установленной на ТЭЦ-4 г. Уфы [2], что говорит о правильности выбора ее установочной мощности.

Аналогичный результат подбора параметров можно получить используя давно разработанные методы многомерного поиска условного экстремума функции мощности (например, метод штрафных функций). При использовании данных методов будут получены те же результаты, но количество расчетов при этом значительно увеличится.

После проведения данной работы были получены следующие результаты:

- В среде Matlab разработана компьютерная модель функции выходной мощности паровой винтовой машины, которая с погрешностью не превышающей 1 % автоматизирует аналитически нереализуемую процедуру расчета выходной мощности паровой винтовой машины (ПВМ) по заданным ее конструктивным (диаметр и длина роторов) и режимным параметрам (технические характеристики используемого пара, скорость вращения роторов).

- Предложена методика определения зависимости выходной мощности ПВМ от восьми ее входных параметров (коэффициент расширения пара, давление пара на входе и выходе ПВМ, температура пара на входе машины и его расход, а также скорость вращения, диаметр и длина роторов ПВМ), позволившая определить условия, при которых ПВМ вырабатывает максимальную мощность.

- Описан метод выбора технически и экономически обоснованных геометрических раз-

меров (диаметра и длины роторов) ПВМ, соответствующих техническим характеристикам подаваемого на ее вход пара.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березин С. Р.** Винтовые детандеры: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2010. 53 с.
2. **Березин С. Р.** Технология энергосбережения с использованием паровых винтовых машин // Теплоэнергетика. 2007. № 8. С. 43–45.
3. **Березин С. Р.** Винтовая расширительная машина. Патент РФ № 2319840, 2006.
4. **Ведайко В. И., Носков А. Н.** Методика расчета объемных и энергетических показателей холодильного винтового компрессора сухого сжатия. 1987. 125 с.
5. **Глушаков С. В., Жакин И. А., Хачи-ров Т. С.** Математическое моделирование. Mathcad 2000. Matlab 5.3. Фолио. 2001. 524 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Гузаиров Мурат Бакевич**, ректор УГАТУ, проф. каф. вычислительн. техники и защиты информации. Дипл. инженер-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по управлению в соц. и экон. системах. Иссл. в обл. системн. анализа, управления в соц. и экон. системах.

**Муравьева Елена Александровна**, доц. каф. автоматизированных технологий и инф. систем фил. УГНТУ в г. Стерлитамак. Дипл. инженер (УГНТУ, 1998). Канд. техн. наук по автоматизации и управлению технологическ. процессами и производствами (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. интеллектуальн. управления.

**Соловьев Константин Андреевич**, асп. УГАТУ, асс. каф. автоматизации производственных процессов фил. УГАТУ в г. Ишимбае. Дипл. инженер (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. интеллектуальн. управления.