ЛЕКЦИИ

3-ей Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Тамбов,
25-27 апреля 2016 года

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

ЛЕКЦИИ

3-ей Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Тамбов,
25-27 апреля 2016 года

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

ТАМБОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПЕРШИНА Р.В.
2016

УДК 658.26
ББК 31.3
Л43

3-я Международная конференция с элементами научной школы проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранд РФФИ № 16-08-20162 Г).

Редакционная коллегия:
Т.И. Чернышова – *ответственный редактор*,
С.Н. Баршутин – *зам. ответственного редактора*,
С.П. Москвитин, Д.Ю. Муромцев, А.П. Пудовкин,
Н.П. Жуков, А.В. Кобелев, С.В. Фролов.

Л43 Лекции 3-ей Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах»: Тамбов, 25-27 апреля 2016 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Тамбовский государственный технический университет; Т.И. Чернышова, отв. ред. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. – 81 с.

В сборник включены лекции ведущих ученых в соответствии с тематикой 3-ей международной конференции с элементами научной школы: «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах»

Предназначен для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов и молодых ученых с целью использования в научно-исследовательской работе и учебной деятельности.

© Тамбовский государственный технический университет, 2016
© Авторы статей, 2016
© Издательство Першина Р.В., 2016

ISBN 978-5-91253-673-1

СОДЕРЖАНИЕ

Balasso A.
BLOOD FLOW STUDIES IN ANEURYSM OF INTERNAL CAROTID ARTERY
USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS 4

Grammelis P.
ТОРРЕФИКАЦИЯ БИОМАССЫ – ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЦЕННОСТИ 9

Губарев В.Я.
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ
ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН 23

Крюков Ю.А.
АНАЛИЗ ТРАФИКА МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ 27

Мироненко И.Г.
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ 34

Муромцев Д.Ю.
МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ 40

Патрикеев Л.Н.
ЧТО ДОЛЖЕН ЗНАТЬ БАКАЛАВР, МАГИСТР,
СПЕЦИАЛИСТ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 46

Сахаров Ю.С., Колуков В.В.
АДАПТИВНЫЕ ИНТЕЛЛЕКУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ 57

Теплицкий Ю.С., Пицуха Е.А., Кузьмин С.Н., Исьемин Р.Л.
ОПТИМАЛЬНОЕ СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА С ВЫСОКИМ ВЫХОДОМ ЛЕТУЧИХ
ВЕЩЕСТВ 67

Шахнов В.А., Семенцов С.Г.
МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ
ПОМЕЩЕНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ 76

Balasso A.

BLOOD FLOW STUDIES IN ANEURYSM OF INTERNAL CAROTID ARTERY USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

Technical University of Munich, Munich, Germany
(email: balasso@tum.de)

Introduction. According to the clinical data and scientific reports the flow conditions plays a major role in the genesis of intracranial aneurysms. The disorder of the flow structure is the cause of damage of the inner layer of the vessel wall, which leads to development of the cerebral aneurysms.

For treatment it is valuable to determine the alterations of the flow field in the aneurysm region. Most of the researchers suggest that wall shear stress (WSS) plays a key role in aneurysm formation and growth. To present, many studies were done to estimate the WSS in an intracranial aneurysm models and to determine the factors, influencing a WSS distribution.

In most studies the flow field is estimated either with an experimental method or with a computational fluid dynamics (CFD) method. Both of these methods have their own disadvantages. The experimental methods are highly dependent on experimental fluid properties and material of the vessel model; while when using CFD methods there is a risk of obtaining a non-physiological solution. The one of possible solutions to overcome these issues is to use an integrated approach for flow study with both experimental and CFD methods. In this work, a detailed experimental and numerical simulation in the patient-specific aneurysm model of internal carotid artery is presented. The purpose of the present paper is to quantitatively study the flow structure in patient-specific aneurysm model of the internal carotid artery and to report the effect of fluid model and wall elasticity on flow characteristics. This research provides valuable results for physicians to evaluate the pre-operational intra-aneurysmal blood flow in the internal carotid artery aneurysm with the similar geometrical configuration.

Methods. A patient-specific model of the internal carotid artery (ICA) with aneurysm was used for the flow studies. The geometry data was taken from a 34 years old man using computer tomography angiography (CTA). The patient data was segmented and smoothed to obtain STL file with patient-specific geometry (Fig.1). The model bounding box is 21.46 x 22.78 x 38.24 mm and the aneurysm size is about 16 x 22 x 18 mm. The diameter of the inlet segment of the vessel is 4.4 mm and the diameter of the outlet segment is 3.8 mm.

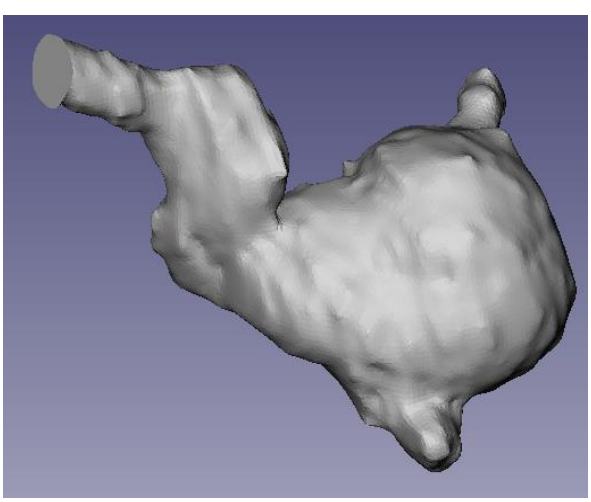


Fig.1. Geometry of aneurysm of internal carotid artery

Using the stereolithography method the wax model of the internal carotid artery was created from the STL file. After that the layers of silicone were put on the wax model until the thickness of the silicone wall was sufficient. In the final step the wax was melted out and the elastic true-to-scale silicone model of the internal carotid artery was obtained.

Using the copy of the silicone model of the aneurysm of the internal carotid artery the velocity measurements were conducted. The scheme of the experimental set-up is shown in Fig.2.

The silicone model was placed on the XYZ-moving table and X, Y, Z velocity components were measured using 1D Laser Doppler Anemometer (LDA). The spatial resolution was 70 umand the distance between two cross-sections was 4 mm. In the cross-section the step for measured points on Y axis was 0.2 mm and 0.625 mm for Z axis. The temporal resolution was 1 ms. Due to the fact that blood cannot be used for the laser measurements (blood red cells absorbs the red light) the polyacrylamid solution was used. This fluid is transparent and has the same non-linear viscosity behavior as blood, but it doesn't show a thixotropic behavior as does blood.

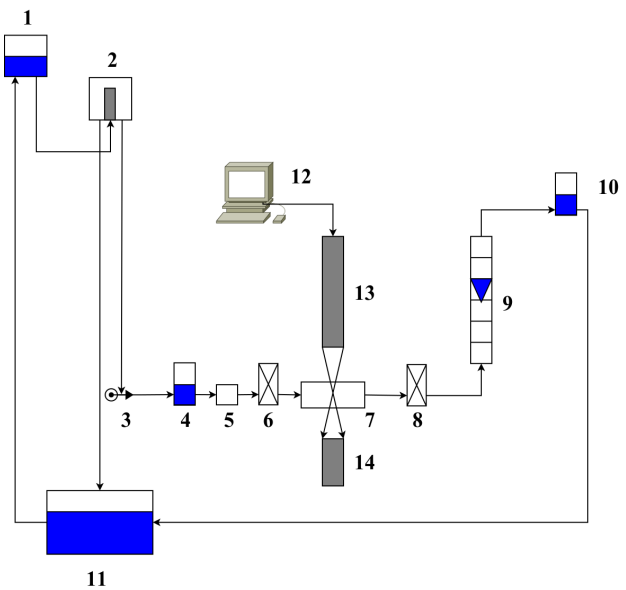


Fig.2. Scheme of experimental setup with LDA

The realistic inlet velocity curve was used in the control program of the pump. The Reynolds number was about 210.

$$\mathrm{Re} = \frac{UD\rho}{\eta},$$

where

U - average fluid velocity over the cross-section of the inlet segment, m/s;

D - diameter of the inlet segment, m;

ρ - fluid density, kg/m^3;

η - fluid dynamic viscosity, $N \cdot s/m^2$.

The duration of the cardiac cycle was set to 1 s and the duration of the systole was 0.4 s. The pump control program was modified to get the systolic pressure of 145 mmHg and diastolic pressure of 80 mmHg.

The flow velocity at every measured point was recorded during seven cardiac cycles and then was averaged.

For the further investigation of the blood flow in aneurysm region the CFD method was used. The following assumptions were used:the fluid is incompressible;the fluid is Newtonian;external forces are neglected;vessel wall is rigid.

According to the assumptions the movement of Newtonian fluid can be described by the following equations:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U}\nabla\mathbf{U} - \nu\Delta\mathbf{U} + \frac{1}{\rho}\nabla P = 0, \tag{1}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

$$div\ \mathbf{U} = 0, \tag{2}$$

where

ν –kinematic viscosity, m^2/s;

P – pressure, Pa.

The boundary conditions were taken from the measured data for the simulation. At the vessel wall a no-slip condition was applied.

The density of fluid was $\rho = 1141\ kg/m^3$. For the Newtonian fluid the shear stress τ was computed as:

$$\tau = \eta\frac{\partial U}{\partial y}$$

where

$\frac{\partial U}{\partial y}$ – shear rate perpendicular to the plane of shear, s^{-1}.

A program was developed for the simulation of model with Newtonian fluid. The simulation was performed with about 10 times lower distance between measured points and 5 time higher temporal resolution then in the experiment. It was simulated T=5 seconds with the time step Δt equals to $2\cdot10^{-4}$ seconds. The problem (1)-(2) was solved using PISO algorithm. The Crank-Nicolson method was used for the time discretization which has the second order approximation. The solution obtained was compared with the experimental data and it showed a good validity with the measurements.

Results. Fig.3 and Fig.4 shows the velocity magnitude and isolines on YZ-cross section at X=0 during systolic peak. The mean velocity of the flow at cross-section is about 0.12 m/s which is only 30% of the average over cross-section inlet velocity. The maximum velocity value is only 20% of the inlet maximum velocity while velocity at the center of the aneurysm cross-section is about 3.1%. The average velocity on the cross-section is only 11% of the inlet axial velocity. The high velocity region locates at the left side of aneurysm (according to the inlet-to-outlet direction) and has an average value about 0.14 m/s. The region with low velocity locates at the center of the cross-section. The average velocity at this region is only 10% of the average over cross-section inlet velocity.

The computed wall shear stress for Newtonian fluid at the systolic peak (t=0.25s) is shown in Fig.5. For the Newtonian fluid the wall shear stress range is [0.00352; 10.2] Pa. The lowest value of the wall shear stress was at the aneurysm sac while the highest wall shear stress was at the beginning of the outlet segment. For the Newtonian fluid the average value of the wall shear stress in the aneurysm region is about 2 Pa. The high level of wall shear stress is on the inlet (about 8 Pa) and outlet (about 10 Pa) segments.

Fig.6 shows the XY cross-section at the center of the aneurysm. The flow velocity varies from $1\cdot10^{-5}\ m/s$ to $0.186\ m/s$. The region with a high velocity value is located on the left side of the aneurysm cross-section (according to the inlet-to-outlet direction). The average velocity value in the region is about 0.17 m/s which is 42% of the inlet velocity value averaged over cross-section. The average velocity in the aneurysm cross-section is about 0.12 m/s. In the aneurysm sac the velocity magnitude

does not exceed 0.002 m/s which is only 1.6% of the average velocity. The region with low velocity is located in the center of the cross-section with an average velocity magnitude about 0.04 m/s, which is 33% of the average over cross-section velocity.

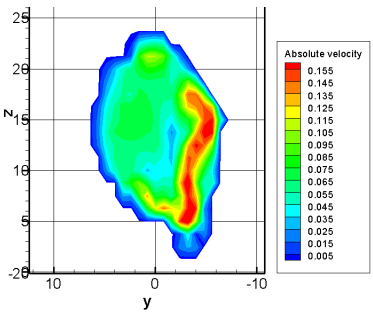


Fig. 3. YZ cross-section of aneurysm region

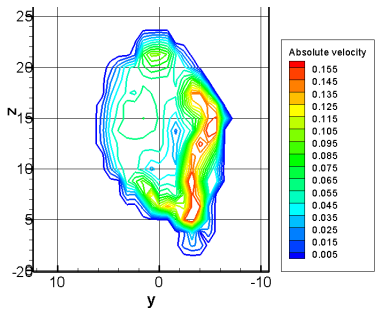


Fig. 4. Velocity isolines on YZ cross-section of aneurysm region

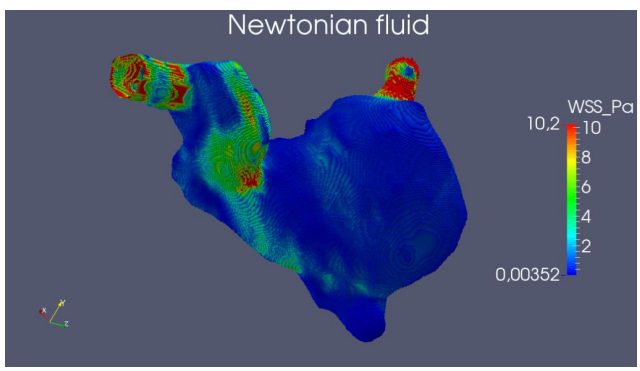


Fig. 5. Wall shear stress distribution in model of aneurysm of internal carotid artery

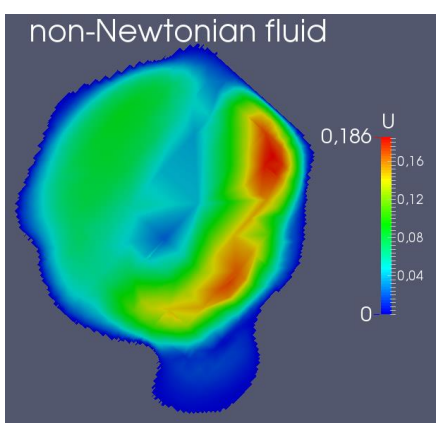


Fig. 6. Velocity distribution over YZ cross-section in model of aneurysm of internal carotid artery

Discussions. The present study defined the flow structure and velocities in the patient-specific aneurysm model of internal carotid artery. Experimental and CFD methods were used together to evaluate the flow fields with Newtonian fluid. The most important factor which determines the circulation in the aneurysm region was the geometry of the artery.

The actual elastic silicone model of the internal carotid artery has a size error, in comparison with segmented STL model, which does not exceed 10%. The experimental data obtained from the velocity

measurements in the elastic aneurysm model using LDA was compared with CFD simulation data using a model with rigid vessel walls. The experimental and numerical results showed a good correlation and had a relative error about 10%. However, for some critical moments, especially for the systolic peak (t=0.25 s), when the elastic model is maximum expanded, the relative difference between CFD and LDA measurements in a cross-section was about 20%. The simulation with a rigid wall leads to over-estimation of the blood velocity, due to the less cross-section diameter than the diameter of the expanded silicone aneurysm model at the systolic peak. There was no significant difference in results founded for other time moments during the cardiac cycle. According to the experimental and CFD results in this case there was no significant difference in the velocity distribution for Newtonian and non-Newtonian fluid.

The present study can be used to estimate the velocity field and wall shear stress distribution in aneurysm models of the internal carotid artery with the similar geometry type. The results show that average velocity in the aneurysm region does not exceed 12% of the velocity of the inlet segment. The existing vortex in the aneurysm region can be the cause of the thrombosis formation. In both cases the wall shear stress in the aneurysm region is lower than 10 Pa, while the lowest values are at the dome of aneurysm, where the aneurysm could ruptures.

The present study and methods can be adapted for usage in the multi-scale studies of hemodynamics for research of the influence of global hemodynamic factors on genesis of the cerebral aneurysm.

Conclusion. The results of the present study are in agreement with the hemodynamics theory of aneurysm genesis. It seems possible, that fluctuations and vortices cause the high frequency vibrations of the aneurysm wall which can be a cause of the aneurysm rupture.

Grammelis P.

ТОРРЕФИКАЦИЯ БИОМАССЫ – ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ

Centre for Research and Technology Hellas, Chemical Process & Energy Resources Institute (CERTH/CPERI), Athens, Greece

Аннотация

Отжиг рассматривается как своего рода низкотемпературный пиролиз, который осуществляется в атмосфере инертного газа (обычно азота). Во время этого процесса, влага исходного топлива и часть его летучих веществ удаляются из биомассы в инертную атмосферу. Термически обработанная биомассы имеет высокую плотность энергии, долговечность и менее гидрофильный характер. Самым выгодным результатом в процессе отжига является то, что количество биомассы может быть уменьшено, так как меньше тонны биомассы необходимо для данного количества энергии. Разработка модели процесса отжига - рассмотрения основных параметров, как температура реакции и время обработки может дать полезную информацию, которая может быть использована для более эффективного проектирования реактора для отжига. Это исследование представляет модель процесса отжига соломы для опытного реактора. Эта модель основана на термодинамическом расчете на одной и / или двухступенчатой модели реактора, разработанного с помощью коммерческого програмного обеспечения ASPEN Plus. Расчет необходимого расхода инертного газа, охлаждающей среды для конкретного вида биомассы, основан на соответствующих значениях, найденных в литературе.

Ключевые слова: солома пшеницы, отжиг, Термодинамическое моделирование, ASPEN Plus

Список символов

Cp коэффициент теплоемкости (Дж / кг K)

E энергиея активации (Дж / моль K)

M масса порции (кг)

K кинетическая скорость (1/с)

t время (с)

$t_{нагрева}$ время нагрева, необходимое для достижения температуры torrefaction

T^* критическое время, по истечению которого начинается вторая стадия отжига и доминирует над первой стадией (с)

T температура (K или °C)

W Твердый остаток массы на каждом шаге по времени (кг)

Греческие символы

λ Теплопроводность (Вт /м K)

ρ Плотность (кг/м^3)

Аббревиатуры

CV теплотворная способность (МДж/кг)

ER рекуперации энергии (-)

HHV высокая теплотворная способность (МДж/кг)

LHV низкая теплотворная способность (МДж/кг)

Индексы

0 Начальные свойства биомассы при T = 0

A Свойства биомасса в течение первого этапа отжига

B Свойства биомасса в течение промежуточной стадии отжига

C окончательные свойства отожженной биомассы

V_1 свойства летучих веществ, которые выделяются в время первой фазы

V_2 свойства летучих веществ, которые выделяются во время второй фазы
1 этап 1
2 этап 2

Введение

В настоящее время, усиливаются направления на достижение высокой теплотворной способности альтернативного биогенного топлива. Отжиг является предварительной термической обработкой, которая применима для преобразования биомассы в тепловую энергию и путем сжигания, газификация или совместного сжигания с обычным твердым топливом. В процессе отжига происходит не только разложение волокнистых структур биомассы, но это также увеличивается теплотворная способность. Кроме того, после отжига биомасса получается менее гидрофильной, таким образом, возрастает время хранения отжженой биомассы. В частности, в связи с разрушением ОН-группы в процессе отжига, материал теряет тенденцию впитывать воду, поэтому он остается более стабильным и гидрофобным [1] по сравнению с исходным топливом. Специально для соломы, из-за ее обилия и низкой влаги, по сравнению с другими видами биомассы (дерево), это считается очень перспективным топливом, в котором может быть применен процесс отжига.

В целом, основные преимущества использования отожженой гранулированной биомассы в сравнении с исходной биомассой является значительное сокращение выбросов CO_2, связанных с ее транспортировкой и ее совместным сжиганием с обычным твердым топливом. Кроме того, отожженная биомассы имеет свойства, которые очень схожи с обычным твердым топливом (H/C и O/C коэффициенты) по сравнению с исходной.

Эти факты значительны при энергетическом использовании отожженного биогенного топлива по сравнению с их исходным, так как стоимость перевозки топлива из биомассы является сокращение за тот же выигрыш в энергии, его теплотворная способность увеличивается, в то время как стоимость изменения, которые должны быть сделаны в малых и / или больших масштабы электростанций при совместном сжигании сценарии применяются, является уменьшается.

С эксплуатационной точки зрения, содержание влаги в отожженых гранулах намного меньше, чем в исходном сырье и поэтому количество тепла, необходимое, чтобы быть предоставляемые другими источниками энергии для их окончательного энергии использования (например, пиролиз, газификация, сжигание) значительно меньше, чем у той, что требуется для сырых один. С эксплуатационной точки зрения, содержание влаги в отожженных гранулах намного меньше, чем у исходного сырья поэтому количество энергии, произведенной из такой биомассы будет больше, а затраты на организацию процесса доставки, хранения и сжигания такой биомассы будут меньше, чем у сырой биомассы.

С другой стороны, эксплуатационные расходы на процесс отжига увеличат общий объем инвестиций стоимости производитель электроэнергии. Тем не менее, для того чтобы дать более точную оценку преимуществ и недостатков этого процесса, ДМС (оценки жизненного цикла) и СВА (анализ затрат и выгоды) анализ должен быть сделан более углубленным.

Отжиг - это процесс низкотемпературного пиролиза, который протекает при температурах 200-300 °C, в процессе которого образуется три основных компонента в том числе, (а) твердый продукт темно коричневого цвета, (б) конденсирующаяся жидкость, в основном вода, уксусная кислота и другие кислородсодержащие соединения и (с), не конденсируемые газы, главным образом CO2, CO, и небольшого количества CH_4 и H_2. Их количество зависит от (а) температуру реакции, (Б) времени обработки и (в) влажности массы материала.

Твердая фаза состоит из хаотической структуры сахара и других веществ реакции. Значительный рост содержания углерода в продукте обусловлен более высокой температурой и большим временем обработки материала. Увеличение теплотворной способности отожженой биомассы происходит перед снижением водорода и кислорода [2, 3]. Газовая фаза включает в себя основные газы, такие как CO, CO_2 и CH_4 и легкие ароматические компоненты, такие как бензол и толуол, но в очень маленьких концентрациях [4]. По Ферро и соавт. [2] Wang и соавт. [5] содержание CH_4, H_2, C_xH_y и CO в газообразных продуктов увеличивается с ростом температуры torrefaction, а содержание CO_2 уменьшается, конденсируемые жидкости состоят в основном из воды, органических частей и липидов. Содержание воды может доходить до высоких процентов. Орга-

нические подгруппы (в жидком виде) состоят в основном из соединений летучих, которые образуются в процессе карбонизации. В итоге, липидная подгруппа содержит такие соединения как воски и жирные кислоты, которые присутствуют в исходной биомассе. По словам Ван и соавт. [5], количество жидкости увеличивается из-за разложения гемицеллюлозы при повышении температуры.

Отжиг оказывает большое влияние на физические / химические свойства твердого продукта, в основном это вызвано тем, что из исходной биомассы происходит удаление кислорода. Таким образом, низшая теплота сгорания возрастает и продукт становится более калорийным. В соответствии с Шан и соавт. [6], процент потерь энергии растет быстрее, чем потеря веса. Это происходит из-за деградации лигнина и целлюлозы в интервале температур 270-300 ° С. Поэтому для того, чтобы достичь желаемого результата (высокого теплосодержания в отожженном продукте), во время этого сложного процесса особое внимание должно быть уделено параметрам температуры и времени обработки.

В этой системе, важным параметром, существенно влияющим на характеристики твердой фракции, является состав исходного сырья (в данном случае исследование: соломенных гранул), количество гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина. Гранулы из соломы состоят из около 7,7% лигнина 41,3% целлюлозы и 30,8% гемицеллюлозы [3]. Таким образом, общий сухой остаток гранул соломы равен 79,8%. В остальном в состав входят другие материалы, такие как смола. Гемицеллюлоза является наиболее реактивной нежели лигноцеллюлозные компоненты, найденные в биомассе, во время отжига она подвергается наибольшему разложению. По словам Пэн и соавт. [7], гемицеллюлоза изолирована от основы соломы пшеницы, состоящий из арабиноксилана и уроновых кислот, которые имеют типичную структуру. Такой типичный мономеров глюкозы, ксилозы, галактозы, арабинозы, глюкуроновой и галактуроновой кислотами. ТГ и ДТГ кривые Пэн и соавт. [7] показывают, что разложение гемицеллюлоз в основном происходит в диапазоне от 190 до 350 °С. Соответствующая температура разложения целлюлозы находится между 305 ° С и 375 °С, в то время лигнин постепенно разлагается в температурном диапазоне 250-500°С. Он отметил, что исследования, проведенные с использованием ксилана показывают, что разложение гемицеллюлозы начинается при температуре выше 200°С, в то время как полное образование летучих происходит при 400 °С. В таблице 1 приведены краткие описания всех экспериментальных исследований для отжига соломы, найденных в литературы. Некоторые из них проводились на различных типах реакторов и с использованием различного оборудования. Параметры влияющие на процесс отжига соломы включают в себя массу азота, скорость потока, скорости нагрева, температура отжига и время обработки материала. Исследования представлены в этой таблице проводились Бриджмена и др. [3], Lanzetta и Блази [8], Принс и соавт. [9], Ферро и др..[2], Wang и соавт. [5] и Садака и соавт. [10]. Из Результатов экспериментов вышеупомянутого исследования видно, что чем выше температура отжига, тем ниже качество биомассы, в то время как теплосодержание возрастает, а выход энергии уменьшается.

В течение достаточно высоких температур (выше 247°С), два последовательных опыта описывают временную эволюцию потери веса. На первом этапе, частицы исходного сырье распадаются на летучие газы и твердые промежуточные соединения, которые в свою очередь распадаются снова в летучие и твердые остатки (вторая фаза).

В рамках настоящей работы необходимо определить набор конструктивных параметров для отжига гранул из соломы масштабе пилотного реактора, мощность которого составляет около 1000 кг /час. Для этой задачи, термодинамические описания процесса отжига создано в коммерческом пакете ASPEN Plus. Очень немногие инструменты моделирования для этого процесса можно найти в современной литературе [11, 12]. Параметрическое исследование о влиянии времени обработки и температуры на окончательные свойства отожженой биомассы проводится для данного расхода сырья биомассы. Из всех результатов, отражающих наиболее эффективную работу пилотной установки, выбраны для его дальнейшего проектирования.

Устройство термодинамической модели

Выходные продукты

Прогнозирование потери массы биомассы осуществляется на основе двухступенчатого механизма отжига, впервые введенной Di Блази и Lanzetta [8], [13]. Согласно которому, для про-

цесса отжига при температуре выше 250 °C, операция проводится в два последовательных этапа, как показано на рис. 1.

На этом рисунке, индекс A обозначает исходную биомассу, B твердый продукт промежуточной реакции, C окончательно отожженая биомасса и V1, V2 летучие вещества, которые образуются при первый и второй стадиях соответственно. В самом деле, на первом этапе происходит деградация гемицеллюлозы, а на втором деградации лигнина. Дифференциальной уравнения, выражающие потерю массы протекает при постоянной температуре в течении все продолжительности стадии 1:

$$\frac{dM_A}{dt} = -K_1 M_A \Rightarrow M_A = M_0 e^{-K_1 t};$$

$$\frac{dM_{V_1}}{dt} = K_{V_1} M_A \Rightarrow M_{V_1} = \frac{K_{V_1}}{K_1} M_0 (1 - e^{-K_1 t});$$

$$\frac{dM_B^{A\to B}}{dt} = K_B M_A \Rightarrow M_B^{A\to B} = \frac{K_B}{K_1} M_0 (1 - e^{-K_1 t}),$$

где M_0 является начальной массы материала и $M_B^{A\to B}$ массы B, которая получается из массы (M_A), на каждом шаге по времени. Соответствующее кинетические параметры для каждой стадии (1 и 2) выражаются в виде :

$$K_1 = K_B + K_{V_1};$$

$$K_2 = K_C + K_{V_2}.$$

Таблица 1. Обзор экспериментальных исследований о отжиге соломы

Исследования	Экспериментальное оборудование	Вход (солома)	Поток азота (мл / мин)	Скорость нагрева (°C/мин)	Температура отжига (°C)	Время обработки (мин)
Ferro et al. [2]	Цилиндрический реактор	65 г	83,33	-	230 250 280	60 120 180
Bridgeman et al. [4]	Анализатор TGA	25-35 г	50	10	250 270 290	30
Wang et al. [3]	Реакторов с неподвижным слоем	22	500	30	200 250 300	30
Lanzetta and Di Blasi [7]	Анализатор TGA	10	-	25-70	200–300*	20–50
Prins et al. [8]	Реакторов с неподвижным слоем	10	-	10-20	250	30
Sadaka et al. [9]	Муфельная печь	50	-	-	200 260 315	15 30 45 60 120 180

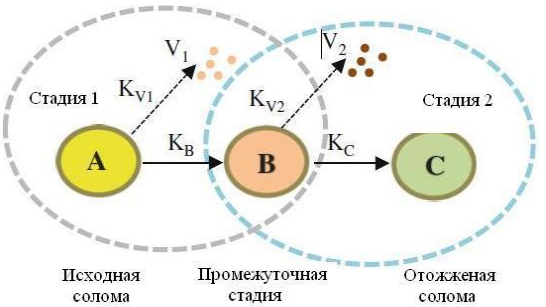


Рис. 1. Двухстадийный процесс отжига

Зависимость температура Аррениуса считается:

$$K_i = k_{0,i} e^{-\frac{E_i}{RT}},\ i = A, B, C, V_1, V_2.$$

При температуре ниже 250°C только на первом этапе имеет место. При температуре T> 250 ° C, есть определенное время, обозначается как критическое время t*, при котором начинается второй этап и доминирует над первым. Это значение является важным для оценки процесса в течение определенного времени реакции, как кинетическая составляющая изменения процесса отжига. t* может быть вычислена аналитически, с учетом того, что в этот момент времени выход твердой фракции B максимально, в соответствии со следующей формулой:

$$\frac{dM_B}{dt} = K_B M_A - K_2 M_B = 0 \Rightarrow K_B M_0 (1 - e^{-K_1 t})$$

В это время t^* выходной продукт из твердой фазы B обозначается как M_B^*. Кроме того он состоит из

$$\frac{M_B^*}{M_0} = \frac{M_{V_{2\infty}}}{M_0} + \frac{M_{C_\infty}}{M_0} = 1 - \frac{M_{V_{1\infty}}}{M_0},$$

где $\frac{M_{V_{1\infty}}}{M_0}, \frac{M_{V_{2\infty}}}{M_0}$ представляют собой максимальное количество выпускаемых летучих веществ на стадии а) и б) соответственно. M_c масса сухого остатка после удаления летучих компонентов. Для соломенных гранул, на основе литературных данных [8], были построены следующие выражения таким образом, что отношение масс продуктов C и летучих V_2 относится к начальной массе M_o $\frac{M_{C_\infty}}{M_0}$ и $\frac{M_{V_{2\infty}}}{M_0}$, которая вычисляется как функция от температуры:

$$\frac{M_{C_\infty}}{M_0} = 0.60 - 0.0041(T - 200) = \frac{K_C K_B}{K_1 K_2};$$

$$\frac{M_{V_{2\infty}}}{M_0} = 0.17 + 0.001(T - 260) = \frac{K_{V_2} K_B}{K_1 - K_2};$$

$$\frac{M_{V_{1\infty}}}{M_0} = \frac{K_{V_1}}{K_1}.$$

В соответствии с [1] и [2] твердая масса остатка W, на каждом шаге по времени, определяется по формуле:

$$\frac{W}{M_0} = \frac{M_A + M_B + M_C}{M_0} = \frac{M_B^*}{M_0} - \left(\frac{M_B^*}{M_0} - \frac{M_{C_\infty}}{M_0}\right)\left(1 - e^{-K_2(t - t^*)}\right)$$

В этих уравнениях время T начинает отсчет с того времени, когда начинается процесс отжига.

Масса M_A была определена на предыдущем этапе, и M_{V2} рассчитывается по формуле:

$$\frac{M_{V_2}}{M_0} = \frac{M_B^* + M_A - W}{M_0} \Rightarrow \frac{M_{V_2}}{M_B^*} = 1 + \frac{M_A - W}{M_B^*}.$$

Снижение массы твердых частиц M_B за счет реакций на стадии 2:

$$\frac{dM_B^{B\to C}}{dt} = -K_2 M_B^{B\to C} \Rightarrow M_B^{B\to C} = M_B^*\left(1 - e^{-K_2\left(t - t^*\right)}\right) \Rightarrow \frac{M_B^{B\to C}}{M_B^*}\left(1 - e^{-K_2\left(t - t^*\right)}\right)$$

где $M_B^{B\to C}$ это масса M_B на стадии 2. Таким образом, получим окончательный вид уравнения твердой массы M_C:

$$\frac{dM_C}{dt} = -K_C M_B^{B\to C} \Rightarrow \frac{M_C}{M_0} = K_{C_\infty}\left(1 - e^{-K_2(t - t^*)}\right) \Rightarrow \frac{M_C}{M_B^*} = \frac{K_C K_B}{K_2(K_1 - K_{V_1})}\left(1 - e^{-K_2(t - t^*)}\right).$$

Твердые и газовые составляющие смеси

Непосредственный (VM (летучие вещества), FC (фиксированный углерод)) и конечный (C, H, O) состав отожженой биомассы может быть определен из соответствующих арифметических выражений, которые основаны на экспериментальных данных исследований отжига соломы пшеницы в литературе. Что касается количества серы, то в литературе не существует данных, связанных с содержанием серы после процесса отжига. Это объясняется трудностью точного измерения серы и низким промышленным интересом. Таким образом, сделано грубое предположение, что вся сера остается в твердой биомассе. Что касается количества азота включенного в частицы биомассы, в соответствии с недавними исследованиями Медика и соавт. [14] предполагается, что в основном азот остаются в твердой биомассе, тем не менее, содержание азота в отожженной биомассе так мало, что его наличие мало влияет на массу и энергетический баланс процесса. Кроме того, первоначальное содержание золы в пересчете на абсолютную массу (кг) после отжига по-прежнему остается в твердом остатке. Это разумное допущение, так как любой механизм передачи пепла из твердого тела в газовую среду не происходит во время отжига.

Для твердой составляющей продукта (C, H, O анализ) используется арифметические выражения, основанные на экспериментальных данных, полученных от работы, выполняемой Ferro [2]. В этом исследовании, несколько экспериментальных серий проводится в единой лаборатории с использованием соломенных гранул в качестве топлива. Температура и время обработки, для которых эти уравнения считаются действительными считаются 230-280 °C и 0-3 ч соответственно.

$$\frac{C_{solid}}{C_{\text{total}}} = -0.0014T - 0.010\frac{t}{3600} + 1.22;$$

$$\frac{H_{solid}}{H_{total}} = -0.0040T - 0.020\frac{t}{3600} + 1.87;$$

$$\frac{O_{solid}}{O_{total}} = -0.0050T - 0.015\frac{t}{3600} + 2.02.$$

С другой стороны, фиксированный углерод (FC) и летучий материал (VM)зависят от температуры отжига в соответствии со следующими уравнениями. Эти уравнения были получены в процессе соответствующих экспериментальных измерений, выполненных Бриджмен и соавт. [3]. В этом исследовании, экспресс-анализ отожженой соломы пшеницы был выполнен в температурном диапазоне 200-300 °C.

$$\frac{FC_{solid}}{FC_{total}} = -0.0003T^2 + 0.1762T - 24.149;$$

$$\frac{VM_{solid}}{VM_{total}} = -0.0122T + 3.88.$$

Как упомянуто выше, летучие виды делятся на две категории: (а) конденсирующихся при низких температурах и (б) неконденсирующихся. В соответствии с литературой, основные компоненты конденсируемых, летучая часть ("жидкость"), полученная в процессе отжига соломы пшеницы являются уксусная кислота (CH_3COOH) и вода (H_2O) [3, 5, 9]. Помимо них также было обнаружено, муравьиная кислота (HCOOH), метанол (CH_3OH), молочная кислота ($C_3H_6O_3$), фурфурол ($C_5H_4O_2$) и гидроксил ацетона [3]. Для упрощения модели, уксусную кислоту и воду в данном исследовании, предполагалось сконденсировать. Образование воды происходит от влажности исходного топлива. Предполагалось рассмотреть только два вида конденсата, не влияющие на точность массового и энергетического балансов [5].

С другой стороны, подавляющее большинство неконденсируемых компонентов ("газ"), являются двуокись углерода (CO_2) и окиси углерода (CO) [3, 5, 9]. Количеством выделяющегося метана (CH_4) без существенной ошибки можно пренебречь, так как его влияние на теплотворную способность газообразного продукта очень мало [2, 9]. Ферро и соавт. [2] показал, что отношение CO_2/CO не сильно изменяется в зависимости от времени обработки, чего нельзя сказать о температуре. Арифметическое выражение, которое основано на экспериментальных данных [2] может быть включено в термодинамическую модель, которое определяется формулой 13:

$$\frac{CO_2}{CO} = 0.0004T^2 - 0.22T + 32.5(\frac{кмоль}{кмоль})$$

Доля газа в жидкой фракции определяется на основе соответствующих исследований Бриджмен и соавт. [3], Wangи др. [5] и Принс и соавт. [9]. Происхождение топлива играет важную роль в этом соотношении, так как удаление летучих компонентов сильно зависит от механизма и скорости разложения структуры гемицеллюлозы. Например, Принс и соавт. [9] обнаружели, что состав и количество неконденсирующихся летучих, для ивы и соломы схожи, в отличие от лиственницы. Это связано с наличием ксилана. Ферро и соавт.[2] измеряли содержание небольшого количества газа (летучие вещества), результаты из которых схожи с результатами Prins и др. [9]. На основании литературных данных [2], мы сделали грубое предположении, что количество газа в жидкости равно соотношению 0,25.

Что касается теплотворной способности, то она становится выше, так как происходит увеличение температуры отжига и времени обработки. Для расчета теплотворной способности продукта твердых тел используются следующие уравнения, [2]:

$$HHV_{daf} = 0{,}34\%C + 1{,}4\%H - 0{,}16\%O \text{ (МДж/кг)}$$

Описание ASPEN Plus модели процесса

Для моделирования процесса отжига, очень немногие инструменты процесса доступны в литературе [11, 12]. Термодинамический инструмент, описывающий процесс отжига гранул из соломы основан на выше упомянутом подходе моделирования, интегрированный в коммерческой аккредитованной программном обеспечение ASPEN Plus. Технологическая схема ASPEN Plus изображена на рис. 2. Процесс отжига моделируется, как упомянуто выше, в два этапа. В термодинамической установке алгоритма, стехиометрический тип реактора (RSTOIC) применяется для второй стадии.

Исходное сырье поступает в первый реактор (RSTOIC), названый «STAGE 1», где первая стадия реакций смоделирована. Кроме того, реакции, протекающие на 2-м этапе осуществляются во втором реакторе (RSTOIC) названым «STAGE 2».

V1 и B определены в инструментальном процессе, как нетрадиционные компоненты, свойства которых (конечный, технический анализ и значение теплотворной способности) оцениваются по ранее описанному арифметическому выражению. Синтез состава выходящих потоков осуществляется на RYIELDS "TORSYN" для твердой биомассы и "VOLSYN"для летучих веществ.

Данные для теплофизических свойств масла происходят из AB & CO [15], а соотношение каждого свойства экстрагируют (T в °C):

$$C_p = 4{,}5426 \cdot T + 1864{,}6 \text{ [Дж/кг·К]}$$

$$\lambda = -7 \cdot 10\text{-}5 \cdot T + 0{,}1356 \text{ [Вт/м·К]}$$

$$\rho = -0{,}8096 \cdot T + 902{,}24 \text{ [кг/м3]}$$

Настоящая модель ориентирована на расчет массы и энергетического баланса процесса отжига. Поэтому, детальный анализ механизма передачи тепла в массе каждой частицы не включены, так как требуется более точное моделирование реактора. Единственное предположение, связанное с механизмом передачи тепла внутри частиц связана с разностью температур (25°C) между температурой нагреваемой / охлаждаемой среды (т.е. горячее масло, охлаждающая жидкость, соответственно), и соответствующие температуры частиц на каждой стадии реактора. Частицы, как считается, проявляют равномерный профиль температуры, по принятым подходом.

Принципы работы реактора Torrefaction

Схематический вид, представляющий принципы работы реактора показан на рис. 3. Это реактор типа печи.

Условия работы

В целом, процесс отжига может быть разделены на два основных этапа: (а) нагрев биомассы и (б) охлаждения. Высокотемпературный теплоноситель ТЛВ – 330 нагревается в специальном котле с топкой кипящего слоя до температуры 255 – 265 ^{o}C, которая примерно на 15 ^{o}C выше температуры внутри реактора. Инертная атмосфера в слое нагреваемой биомассы может обеспечиваться либо за счет подачи в слой инертного газа (азота), либо за счет выделяющихся при нагреве

из биомассы газов (в основном, двуокиси углерода и паров воды), которые вытесняют воздух из пространства между частицами биомассы. Необходимый расход азота рассчитывается на основе предыдущих исследований процесса отжига в экспериментальных устройствах [2], где на 65 г биомассы используется 5 л / ч азота. Для опытных заводов, таких данных может не найти.

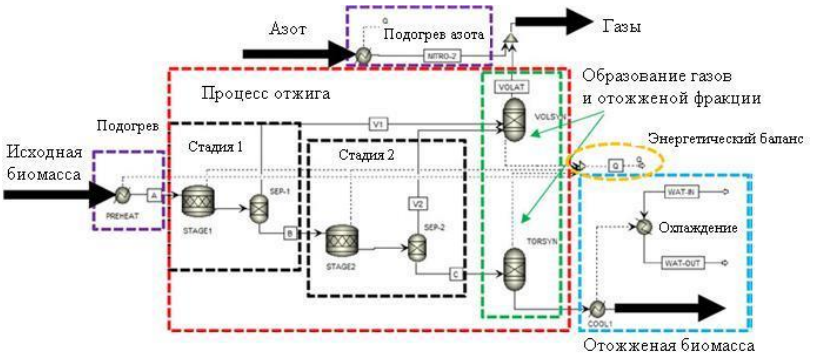


Рис. 2. Технологическая схема ASPEN Plus

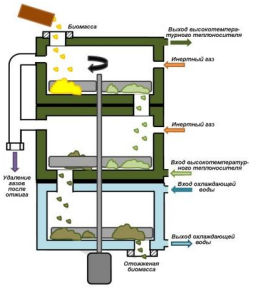


Рис. 3. Схема макета реактора для отжига биомассы

На втором этапе, отожженый продукт дополнительно охлаждается ниже 200°C, пока не достигнет желаемой конечной температуры около 50°C. Охлаждающая среда воды. Температура воды на входе установлена около 15°C. Последнее значение было выбрано ниже значения 50°C, в целях обеспечения соответствия с природоохранным законодательством для открытого разряда сточных вод.

Компоненты опытно-экспериментального завода

Биогранулы поступают в верхнюю часть ректора и с помощью мешалки перемещаются по горизонтальной тарелке к выгрузному отверстию, через которое гранулы поступают в нижнюю, охлаждаемую, часть реактора. Мешалка имеет две лопасти. Скорость вращения мешалки может регулироваться.

Тарелки реактора (плиты) представляют собой диски круглой формы, имеющие плоскую поверхность. Тарелки имеют пересыпные отверстия круглой формы. На каждой тарелке есть только одно пересыпное отверстие, которое позволяет биомассе с верхних тарелок пересыпаться на нижние. Они сконструированы таким образом, чтобы обеспечить нужное время обработки биомассы на каждой стадии. Стационарные лотки крепятся к боковой стенке сосуда, в то время как рабочее колесо вращается вместе с валом каждой тарелки.

Лопасти мешалки могут быть жесткозакрепленными, с поддержкой ребра или другой радиальной жесткостью или полужесткими. Лопасти мешалки вращаются вместе с валом, смещая биомассу по поверхности тарелки. В процессе перемещения биомассы высушивается и нагревается от горячего инертного газа, циркулирующего внутри реактора. Для подачи инертного газа предназначен один или несколько входов. Так же может быть одна или несколько лопастей мешалки, расположенных радиально для каждой тарелки.

Результаты и обсуждение

Проверка модели

Модель проверялась до температуры до 300 °С, т.к. выше этой температуры наблюдается уже не мягкий пиролиз и любые скорости и уравнения, описанные в данной статье, уже не допустимы. Как указывалось в предыдущем разделе, все расчеты делались на основе экспериментальных данных, взятых в литературе для соломы. Однако, описанный метод моделирования может быть применим для любых видов твердой биомассы. Если привлечь соответствующие экспериментальные данные.

Для проверки термодинамической модели использовались экспериментальные данные, представленные Prins et al. [12]. Prins et al. [12] представили данные по потерям массы для двух значений температур (248 and 267 °С), которые были экстраполированы для других значений температуры. Эти данные представлены в Таблице 2. Эти результаты экстраполяции вместе с экспериментальными данными представлены на рис. 4, показывающем очень хорошее соответствие для обеих температур. Следует отметить, что модель не в состоянии дать достоверные данные для температур ниже 240 °С, т.к. согласно экспериментальных данных, введенных в модель, процесс отжига при таких низких температурах невозможен.

В следующих параграфах представлены параметрические исследования для одно – или двухстадийной пилотной установки. Разработанная модель способна дать важную информацию для реального процесса отжига, как то: теплотворную способность конечного продукта, состав жидкой, газовой и твердой фазы после отжига, расход жидкого топлива для процесс отжига, расход инертного газа (азота) и охлаждающей среды (воды), а также время, необходимое для отжига.

Ниже мы вводим время (t_{heat}) ($0 < t < t_{heat}$), время необходимое для прогрева биомассы до температуры начала отжига. Это время принято равным 1500 с [16]. Это значение может меняться в зависимости от скорости нагрева, свойств биомассы (плотность, теплоемкость и т.д.), размеров реактора. Кроме того, не учитывается удаление влаги и летучих при нагреве биомассы от комнатной температуры до температуры отжига. Это предположение близко к реальности, т.к. в этот период имеет местно только внутренний прогрев биомассы. Сушка же биомассы, имеющая место при температуре выше 100 °С, учитывается в первой стадии процесса с помощью соответствующих зависимостей.

Состав конечного твердого продукта для одностадийного реактора.

Таблица 3 представляет состав отожженной биомассы (время отжига 3500 с.), как функцию температуры отжига.

При отжиге выделение летучих идет с большой скоростью, причем наиболее сильно выделяется кислород, что ведет к повышению теплотворной способности биотоплива. Также в биотопливе увеличивается содержание золы.

Рис. 5 представляет соотношение H/C к O/C для отожженной биомассы, отражающей тот факт, отожженная биомасса по своим свойствам приближается к ископаемому топливу (лигниту), что очень важно для организации эффективного совместного сжигания. Кроме того, рис. 5 показывает определяющую роль, которую играет отжиг для повышения теплотворной способности биотоплива за счет, прежде всего, уменьшения содержания кислорода при сохранении концентрации водорода. Таблица 4 представляет молярный состав летучих. Повышение температуры приводит к увеличению теплотворной способности летучих (рис. 6). Это связано с повышением содержания окиси углерода и уксусной кислоты.

Параметры одностадийного реактора.

Основные расчетные параметры такого реактора приведены в таблице 5, включая расходы основных технологических сред. Из таблицы 5 видно, что для повышения температуры отжига нужно увеличение расхода теплоносителя, особенно при температурах выше 250 °С. Для увеличения температуры на 10 градусов требуется двукратное увеличение расхода. С другой стороны, менее отожженная биомасса требует меньшего расхода воды для охлаждения до температуры 50 °С.

Содержание энергии в отожженной биомассе растет с температурой отжига (на 20 % при температуре отжига выше 240 °С в сравнении с исходной биомассой). Это соответствует данным

Ferro et al. [2], которые показали, что при времени обработки больше 3660 секунд не наблюдается значительного роста калорийности биотоплива. Влияние температуры на изменение состава и структуры биомассы показано на рис. 7. С повышением температуры все большая часть гемицеллюлозы начинает реагировать. При температуре выше 250 °С начинается разрушение лигнина и кривые изменения массы образца при отжиге становятся более резкими. В соответствии с этим графиком температуры выше 260 ° следует избегать из-за очень больших потерь массы образца. Такой узкий температурный диапазон осуществления процесса представляет большие сложности, особенно для соломенных гранул. Тем не менее, если задачей является повышение теплотворной способности биомассы не взирая на энергоэффективность (ER), то температуры выше 350 °С являются предпочтительными.

Рисунок представляет собой зависимость энергоэффективности процесса (ER), рассчитанную по уравнению 18, для различных температур процесса. Величины выше 100 % в начале процесса не нарушают энергетического баланса, а отражают рост теплосодержания биомассы в результате ее нагрева. Однако, с увеличением продолжительности обработки величина ER сводится к почти постоянной величине, снижаясь каждый раз с увеличением температуры обработки.

$$ER = (m_{tor}\, LHV_{tor}) / (m_{raw}\, LHV_{raw}) \quad (18),$$

где m_{raw} - масса исходного материалal (кг), m_{tor} - масса материала после пиролиза (кг), Q_{raw}, Q_{tor} – низшая теплота сгорания биомассы (МДж/кг) исходной биомассы и биомассы после отжига.

На основании данных, представленных на рисунках 3 и 4, было приятно решение вести процесс при температуре в диапазоне температур 240 – 250 ^{o}С для достижения максимальной энергоэффективности процесса и минимизации потерь массы образца при обработке.

Двухстадийный реактор – состав твердого продукта.

В двухстадийном реакторе процесс идет в две стадии – на первой стадии гранулы обрабатываются при определенной температуре, а затем они поступают на вторую стадию, где процесс уже идет при другой температуре, после чего гранулы охлаждаются. Схема реактора представлена на рис. 9. Процесс моделируется по той же методологии. Но вводятся две температуры T_1 и T_2, для которых рассчитываются кинетические параметры процесса. Для второй стадии время, прошедшее на первой стадии, рассматривается как t_{heat2}.

Во всех случаях параметрами процесса является температура отжига (для каждого этапа), а общее время пребывания принимается равным 5100 секунд (время реакции около 1 час). Это время было определено на основании многочисленных экспериментов [2, 3, 5, 6]. Это время считается достаточным для значительного повышения теплотворной способности гранул при отжиге без значительных потерь массы. В таблице 6 приведены окончательные результаты процесса из четырех рассмотренных сценариев.

По итогам параметрического исследования, двухстадийный реактор с более высокой рабочей температуры на первом этапе (сценарий 2) имеет значительные преимущества (большая потеря масса и большая энергоэффективность) в сравнении с одностадийным реактором (вариант 4).

Кроме того, применение высокой температуры на первом этапе по сравнению с вторым, способствует повышению эффективности, так как следует из сравнения с сценария 2 со сценариями 1 и 3. Кроме того, эквивалентное распределение времени (сценарий 1) между двумя этапами не имеет существенного влияния на эффективность работы установки, когда разница во времени обработки на этапах не очень большая (менее 10% - сценарий 3).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что энергоэффективность двухстадийного процесса наиболее высока в том случае, если на первой стадии обработка биомассы идет при более высокой температуре, чем на второй. На рис. 10 представлена потеря массы образца для каждого из сценариев. В заключение надо отметить, что основное преимущество двухстадийного реактора над одностадийным заключается в большей энергоэффективности первого (92 % против 81 %). Но двухстадийные реакторы более сложны по конструкции и более дорогостоящие. Конкретных данных мы пока привести не можем, т.к. подобные реакторы не построены.

Заключение

В данном исследовании описана модель процесса отжига биомассы, способная предсказать значения температуры и времени пребывания для наиболее эффективной работы пилотного за-

вода по отжигу соломенных гранул. Эта модель разработана на основе коммерческого программного обеспечение ASPEN Plus ®. Модель предсказывает состав продуктов отжига, скорость убыли биомассы в ходе процесса, причем результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Эта модель применяется для экспериментального реактора для отжига соломенных гранул. Параметрические исследования (количество ступеней, температура отжига и время пребывания) показали, что модель позволяет выбрать оптимальные параметры с точки зрения энергоэффективности процесса. С этой точки зрения применение двухстадийного реактора представляется более предпочтительным, чем одностадийного.

Это исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

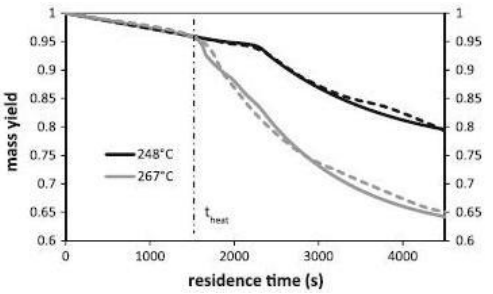


Рис. 4. Потери массы по модели в сравнении с экспериментальными данными (пунктирные линии). По оси абсцисс- время обработки (с), по оси ординат – потери массы

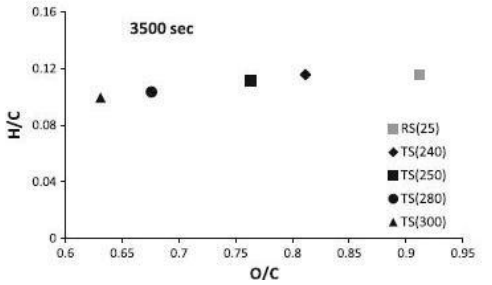


Рис. 5. O/C и H/C соотношения для разных образцов (RS – исходный, TS – отожженный), время обработки 3500 с.

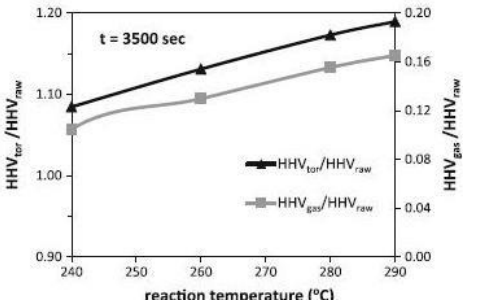


Рис. 6. Увеличение теплотворной способности для различных температур отжига при времени обработки 3500 с. Ось абсцисс – температура реакции, ось ординат – соотношение высшей теплоты сгорания после отжига к соответствующей величине до отжига.

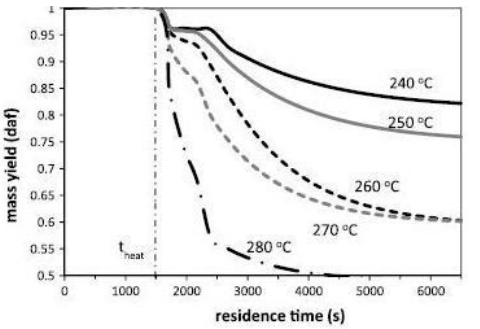


Рис. 7. Подрисуночная надпись – Изменение потери массы при разной температуре отжига. Ось абсцисс – время пребывания (с), ось ординат – потери массы (на сухую биомассу).

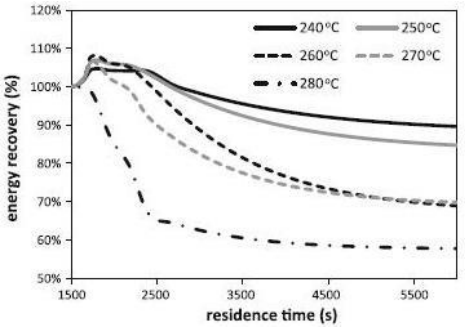


Рис. 8. Подрисуночная надпись- изменение энергоэффективности процесса отжига в зависимости от температуры. Ось абсцисс – время пребывания (с), ось ординат – энергоэффективность

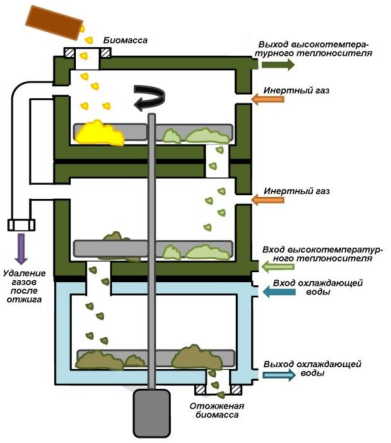


Рис. 9 . Схема двухстадийного реактора.

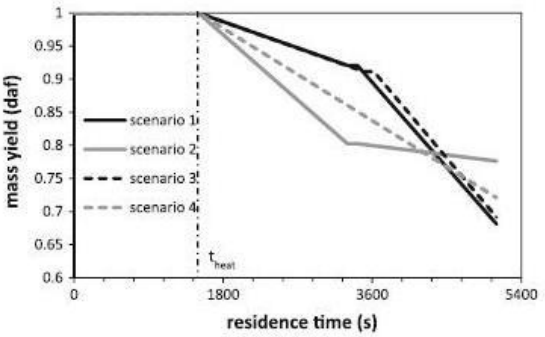


Рис. 10. Потери массы в зависимости от времени обработки для каждого сценария.

Таблица 2 – Кинетические параметры

i	ko (s^{-1})	E (J/mol)
B	0.00327	3,4856
V1	5 x 10^{19}	240,657
1	0.1656	20,376
C	0.01921	1.5894 x 10^{4}
V2	84.79	5.629 x 10^{4}
2	0.5135	28,692

Таблица - 3 Химический состав топлива в зависимости от температуры (время выдержки 3500 с)

T (°C)	Состав % на сухую массу			Химический состав (% на сухую массу)			
	FC	VM	ASH	C	H	O	N
25 (исход-	19.3	69.6	11.1	49.04	5.72	44.67	0.56
240	17.66	70.50	11.84	50.66	6.00	42.69	0.64
260	30.68	56.55	12.77	52.92	5.90	40.39	0.78
280	42.59	42.69	14.71	55.47	5.77	37.63	1.13

Таблица 4 Зависимость состава газа от температуры (% v/v-N2 нет), t = 3,500 с.

T (°C)	CO_2 (%)	CO(%)	H_2O	CH_3COOH
240	8,13	3,00	85,34	3,71
260	7,78	3,30	85,22	3,69
280	7,75	3,42	85,18	3,65

Таблица 5 - Расходы сред, требуемые для отжига биомассы с получением ее характеристик, представленных в Таблице 3 при времени обработки 3,500 секунд. Mass rate (kg/h) – массовый расход, Thermal oil – термомасло, Cooling water – охлаждающая вода, Nitrogen make-up – подготовленный азот, Solid yield – выход твердого продукта.

Расход (кг/ч)	T=240 °C	T=250 °C	T=260 °C
Высокотемпературное масло	288	628	1200
Охлаждающая вода	436,8	410	376,6
Азот	7,7	7,7	7,7
Выход твердого продукта	86,71	80,18	72,27

Таблица 6 – Сравнение одно - и двухстадийного реакторов по энергоэффективности.

	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
T стадии 1 (°C)	240	260	240	260
T стадии 1 (°C)	260	240	260	
$t_{нагрева}$ (c)	1,500	1,500	1,500	1,500
t_1 (c)	1,800	1,800	1,800	3,600
t_2 (c)	1,800	1,800	1,600	
Выход продукта (%)	68,11	77,62	69,15	72,09
HHV_{tor}/HHV_{raw}	1,19	1,19	1,19	1,13
ER (%)	81,20	92,53	82,43	81,62

Список литературы

1. Chew, J.J., Doshi, V.: Recent advances in biomass pretreatment- Torrefaction fundamentals and technology. Renew. Sust. Energy Rev. 15, 4212-4222 (2011)
2. Ferro, D.T., Vigouroux, V., Grimm, A., Zanzi, R.: Torrefaction of agricultural and forest residues. Cubasolar April 12-16 Guantanamo; Cuba (2004)
3. Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I., Williams, P.T.: Torre- faction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. Fuel 87, 844-856 (2008)
4. Jaya S. Tumuluru, S. Sokhansanj, Christopher T. Wright, J. Richard Hess, Richard D.: Boardman, A review on biomass torrefaction process and product properties, symposium on thermochemical conversion, Oklahoma State University, Stillwater, OK, August 2011
5. Wang, G., Luo, Y., Deng, J., Kuang, J., Zhang, Y.: Pretreatment of biomass by torrefaction. Chin. Sci. Bull. 56, 1442-1448 (2011)
6. Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Thomsen, T., Stelte, W., Henriksen, U.B.: Changes of chemical and mechanical behavior of torrefied wheat straw. Biomass Bioenergy 40, 63-70 (2012)
7. Peng, Y., Wu, S.: The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicellulose. J. Anal. Appl. Pyrol. 88, 134-139 (2010)
8. Lanzetta, M., Di Blasi, C.: Pyrolysis kinetics of wheat and corn straw. J. Anal. Appl. Pyrol. 44, 181-192 (1998)
9. Prins, M., Ptasinski, K., Janssen, F.: Torrefaction of wood Part 2. Analysis of products. J. Anal. Appl. Pyrol. 77, 35-40 (2006)
10. Sadaka, S., Negi, S.: Improvements of Biomass physical & chemical characteristics via torrefaction process Environ. Prog. Sustain. Energy 28(3), 427-434 (2009)
11. Dudgeon, R.: An aspen plus model of biomass torrefaction. University Turbine Systems Research (UTSR) Fellowship (2009)

12. Hardianto, T.H., Pasek, A. D., Suwono, A., Azhari, R., Ardi- ansyah, W.: The Aspen Simulation of a Peat Torrefaction System. Proceedings of International Symposium on Sustainable Energy and Environmental Protection (ISSEEP) (2009)

13. Di Blasi, C., Lanzetta, M.: Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. J. Anal. Appl. Pyrol. 40-41, 287-303 (1997)

14. Medic, D.: Darr. M., Shah A., Potter B. Zimmerman J. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. Fuel 91, 147-154 (2012) http://www.abco.dk

15. Prins, M., Ptasinski, K., Janssen, F.: Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics. J. Anal. Appl. Pyrol. 77, 28-34 (2006)

Губарев В.Я.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Проведен сравнительный анализ эффективности использования для охлаждения лопаток газовых турбин циклового воздуха, водяного пара и тонкодисперсного водовоздушного аэрозоля. Показано, что применение водяного пара и, особенно, водовоздушного аэрозоля значительно увеличивают теплосъем с охлаждаемой поверхности, снижают удельный расход охладителя и потери давления.

The analysis of productivity for cooling of turbine-blades of air, water vapor and of atomized water aerosol is conducted. Is indicated, that the application of a water vapor and, specially, of atomized water aerosol considerably is augmented of heat extraction with chilled surfaces, reduce specific consumption of the agents and pressure loss.

Современный этап развития энергетики характеризуется все более широким использованием газотурбинных и парогазовых установок. Повышение их энергетической эффективности опирается на повышение температуры газа перед газовой турбиной, что требует создания высокоэффективных систем охлаждения проточной части газовой турбины и оценки эффективности различных хладагентов [1,2]. В качестве такого хладагента в основном используется цикловой воздух ГТУ, отбираемый от соответствующих ступеней компрессора. Но увеличение температуры газа перед турбиной и, соответственно, увеличение давления воздуха за компрессором сопровождается ростом его температуры и снижением эффективности охлаждения. В настоящее время в качестве альтернативы рассматривается использование водяного пара с последующим выпуском его в проточную часть [2]. Одним из перспективных хладагентов может быть тонкодисперсный водовоздушный аэрозоль с диаметром водяных капель 20 – 50 мкм. При малых размерах капель жидкости аэродинамические силы значительно больше сил инерции и скорость скольжения фаз при любом внезапном изменении скорости одной из них очень быстро стремится к нулю. Двухфазный газожидкостный поток ведет себя как единая двухкомпонентная жидкость, состоящая из газа, в котором распределена жидкая фаза – второй компонент. В этом случае применима гомогенная модель течения и движение тонкодисперсного газожидкостного потока описывается обычными дифференциальными уравнениями течения гомогенной жидкости с использованием параметров смеси – скорости, плотности и вязкости [3,4,5]. По сравнению с воздухом или водяным паром водовоздушный поток имеет значительно большие средние значения плотности и теплоемкости, причем распределенная в газе жидкофазная компонента занимает менее 0,05 общего объема, но имеет большие теплоемкость и плотность, возможность фазовых переходов на поверхности раздела фаз.

В данной работе проведен сравнительный анализ эффективности использования циклового воздуха, насыщенного водяного пара и водовоздушного аэрозоля для охлаждения лопаток ГТУ. Основным параметром принята плотность теплового потока, отводимого к хладагенту от внутренней поверхности лопаток.

Для анализа принята лопатка с петлевой схемой течения охладителя, выпуском хладагента в проточную часть и внутренним продольным оребрением. В расчете использовались следующие граничные условия: давление на входе в каналы лопатки 10 – 30 бар, температура воздуха – температура адиабатного сжатия воздуха с начальной температурой 15°С до этого давления, температура пара – температура насыщения при соответствующем давлении, температура аэрозоля – температура смешения сжатого воздуха с водой при температуре 15°С, температура стен-

ки канала охлаждения – 750°С, диаметр канала охлаждения – 5 мм. Коэффициент оребрения К = 2, относительная (по отношению к поверхности, воспринимающей тепловой поток).

Для каждого из хладагентов методом последовательных приближений для различных значений плотности теплового потока на лопатку решалось уравнение теплового баланса

$$q = (h_{вых} - h_{вх})g = K\alpha\vartheta_{ср}$$

где g – удельный расход хладагента, кг/(с·м^2), $h_{вых}$ и $h_{вх}$ – энтальпия хладагента на выходе и на входе, $\vartheta_{ñð}$ - средний температурный напор, K – коэффициент оребрения.

Течение воздуха и пара в каналах подобно, поэтому коэффициенты теплоотдачи для воздуха и пара находились по критериальному уравнению $Nu = 0.04\,\mathrm{Re}^{0.8}$, коэффициент 0,04 взят для турбулентного течения в каналах с учетом увеличения среднего значения за счет отрывных зон и центробежных сил. Предельная величина скорости воздуха и пара в каналах принята 200 м/с. Коэффициенты теплопроводности, вязкости и плотность определялись при средней температуре хладагентов.

Определения коэффициентов теплоотдачи водовоздушного аэрозоля имеет существенные отличия. Результаты исследования теплообмена неподвижной тонкодисперсной газокапельной среды с высокотемпературной поверхностью приведены в [4], а при продольном омывании пластины водовоздушных потоком - в работе [5]

Течение в каналах лопаток характеризуется высокой турбулентностью потока на входе, наличием отрывных зон, действием значительных центробежных сил для рабочих лопаток, поэтому можно предположить, что теплообмен определяется контактом молей аэрозоля с поверхностью без образования чисто газового ламинарного подслоя. При условии, что теплообмен сопровождается нагревом капельной фазы до температуры насыщения и частичным испарением капель, воспользуемся результатами работы [4], где показано, что при прогреве и частичном испарении капель, коэффициент теплоотдачи находится по критериальному уравнению

$$Nu = 2.8D^{0.5} \qquad (1),$$

где критерий Нуссельта определен по диаметру капель; $D = \dfrac{d\rho_{ã}}{\rho_{ê}}$ - приведенное объемное влагосодержание; d – массовое влагосодержание аэрозоля, т.е. отношение массы воды к массе сухого воздуха, кг/кг; $\rho_{ã}$ и $\rho_{ê}$ - плотность воздуха (газа) и воды (капельной фазы) соответственно.. Расчеты проведены для водовоздушного аэрозоля с диаметром капель 25 мкм, влагосодержанием 0,4 -1,0 кг/кг и средним коэффициентом испарения капельной фазы, учитывающим частичное испарение капель 0,0-0,4.

На рис. 1 приведена зависимость удельного расхода хладагента от плотности теплового потока на лопатку при давлении в каналах 10 бар, а на рис. 2 – при давлении 30 бар.

Таким образом, использование циклового воздуха для охлаждения лопаток ограничивает предельный теплоотвод от охлаждаемой поверхности на уровне при удельных расходах 1,2 – 5,2 кг/(м^{2}с), причем наблюдается резкий рост удельного расхода при повышении давления в каналах лопатки. Использование водяного пара существенно (в 2 - 3 раза) снижает удельный расход и увеличивает допустимую плотность теплового потока до 6·10^5 Вт/м^2.

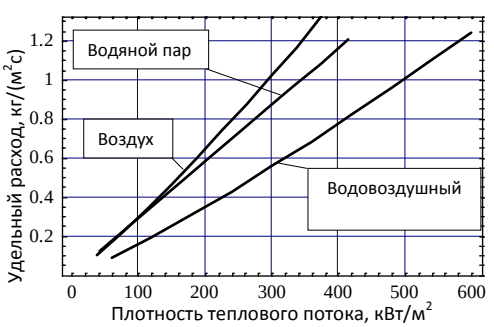


Рис. 1. Зависимость расхода хладагента от плотности теплового потока. Давление 10 бар, влагосодержание 0,6 кг/кг, коэффициент испарения 0,2

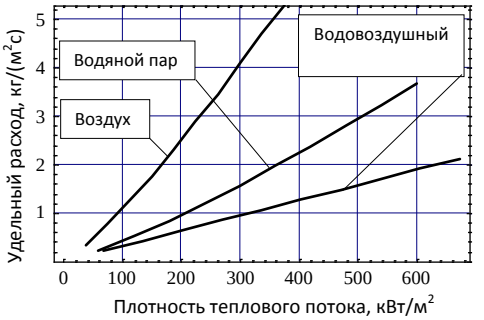


Рис. 2. Зависимость расхода хладагента от плотности теплового потока. Давление 30 бар, влагосодержание 0,6 кг/кг, коэффициент испарения 0,2

Удельный расход водовоздушного аэрозоля в 4 – 5 раз меньше удельного расхода циклового воздуха при этом максимальная допустимая плотность теплового потока достигает $6 \cdot 10^5$ Вт/м^2. Повышение влагосодержания аэрозоля сопровождается снижением удельного расхода и ростом допустимой плотности теплового потока. Снижение влагосодержания, естественно, дает противоположный эффект и при влагосодержании 0,4 кг/кг эффективность аэрозольного охлаждения соответствует паровому охлаждению. Дальнейшее снижение влагосодержания делает аэрозоль все менее эффективным хладагентом. Следует отметить, что водовоздушные смесители позволяют получать тонкодисперсные аэрозоли с объемным влагосодержанием до 0,02-0,03 капельной фазы, что при давлении в каналах 30 бар соответствует массовому влагосодержанию до 2 кг/кг. При таком влагосодержании можно обеспечить теплосъем до $1{,}5 \cdot 10^6$ Вт/м^2 и расходе аэрозоля 2 кг/(м^{2}с) для давления в каналах 30 бар. Такое же влияние на показатели эффективности имеет коэффициент испарения. Увеличение коэффициента испарения, естественно, снижает расход водовоздушного аэрозоля и увеличивает его эффективность, но при значении свыше 0,4 начинается резкое снижение коэффициента теплоотдачи

Еще одним фактором, характеризующим эффективность использования хладагента, служит величина затрат тепла на нагрев охладителя в проточной части после выпуска из лопатки.

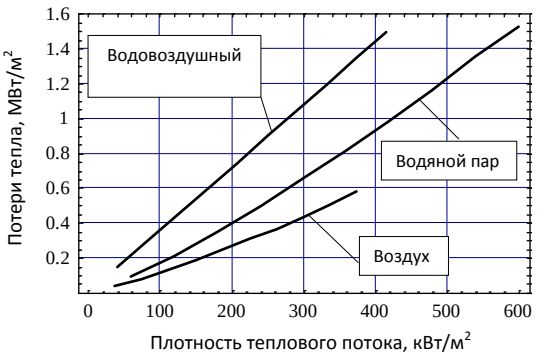


Рис. 3. Зависимость потерь тепла от плотности теплового потока. Давление 10 бар, влагосодержание 0,6 кг/кг, коэффициент испарения 0,2.Расчетная температура газа в проточной части 1000°С

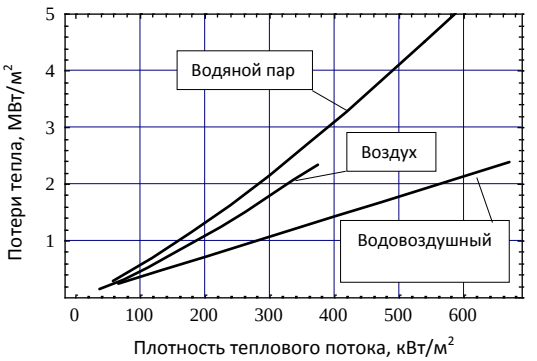


Рис. 4. Зависимость потерь тепла от плотности теплового потока. Давление 30 бар, влагосодержание 0,6 кг/кг, коэффициент испарения 0,2. Расчетная температура газа в проточной части 1000°С

Оценка этих затрат для воздуха, водяного пара и водовоздушного аэрозоля проведена при температуре газа в проточной части 1000°С. Рассчитанные удельные потери тепла, МВт на 1 $м^2$ охлаждаемой поверхности представлены на рис. 3. и рис. 4. При давлении в каналах лопатки 10 бар максимальные потери тепла дает использование водовоздушного аэрозоля за счет затрат тепла на испарение капельной фазы в проточной части турбины.

С ростом давления потери тепла увеличиваются для воздуха и водяного пара из-за быстрого роста расхода, тогда как для водовоздушного аэрозоля они практически не меняются и при давлении 30 бар аэрозоль дает наименьшие удельные затраты тепла.

Выводы.

Использование в качестве хладагента водяного пара повышает удельный теплосъем с единицы охлаждаемой поверхности и существенно снижает удельный расход но сопровождается увеличением потерь тепла газового потока на нагрев выпускаемого в проточную часть пара.

Использование водовоздушной смеси даже при относительно небольших значениях влагосодержания наиболее эффективно с точки зрения увеличения удельного теплосъема, снижения удельного расхода, так и снижения потерь тепла газового потока, особенно при увеличении степени повышения давления в компрессоре. Потери тепла на испарение капельной фазы и нагрев водовоздушной смеси в проточной части турбины при небольших значениях степени повышения давления $\pi_к$ существенно превышают потери при использовании циклового воздуха и насыщенного пара, но при $\pi_к$ >15 эти потери сравнимы, а при $\pi_к$ >20 становятся заметно ниже потерь при использовании и циклового воздуха и насыщенного пара.

Библиографический список

1. Епифанов В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З., Газопаровая установка с вводом пара в газодинамический тракт: основные научные и технические проблемы. Текст. // Теплоэнергетика. 1993. №3. С. 46-52.
2. Пиралишвили Ш.А., Стрельникова Н.Н., Исаев Д.Г., Применение «острого» пара для охлаждения теплонапряженных элементов газовых турбин, работающих в составе комбинированных ПГУ. Текст. // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». - М.: МЭИ, 2007, т. 2, С. 342-345.
3. Губарев В.Я., Условия применимости гомогенной модели течения двухфазных газожидкостных потоков. Текст. // Механика и процессы управления. Труды XXXIII Уральского семинара.- Миасс.: 2003. - С. 0-87.
4. Губарев В.Я., Шацких Ю.В., Теплообмен газокапельной среды с высокотемпературной поверхностью, Текст, // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 5. – С. 774–779.
5. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Теплообмен при турбулентном течении газожидкостного потока в высокотемпературном цилиндрическом канале. Текст. // Вестник Тамбовского государственного технического университета., 2012, Т. 18. №3 С. 614-619.

Крюков Ю.А.

АНАЛИЗ ТРАФИКА МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ

Государственный университет «Дубна»
kua@uni-dubna.ru

Аннотация

Внедрение методов и технологий динамического анализа значений потребляемого тока в линиях электроснабжения многоквартирных домов позволяет оптимизировать объемы тепловых потерь в электросетях. В статье представлены результаты статистического анализа мгновенных значений электропотребления группы бытовых потребителей на примере 54-х квартирного дома. На основе ранее проведенного исследования в области мониторинга и прогнозирования информационного трафика в сетях передачи данных, а также с учетом единства природы потребления различных ресурсов человеком в ходе своей повседневной деятельности, автором предложена гипотеза о наличии закономерностей в динамике электропотребления. В ходе подготовки эксперимента разработана система «Энергия», позволяющая вести мониторинг значений тока на коротких временных интервалах с записью измерений в базу данных в реальном масштабе времени. Показано, что статистическое распределение полученных значений удовлетворяет логарифмически-нормальной функции с легко контролируемыми параметрами. Ведение мониторинга позволяет обнаруживать несанкционированные подключения потребителей, наличие проблем в контактах переключателей, токов утечки при неисправной изоляции. Компенсация кратковременных высоких значений тока источником, расположенным вблизипотребителей позволяет существенно сократить тепловые потери в линиях электроснабжения.

Ключевые слова: потери в линиях электропередачи, энергоэффективность, логарифмически-нормальное распределение, динамический мониторинг электропотребления, территориально-распределенная электрогенерация.

Abstract: Implementation of methods and technologies of dynamic analysis of quiescent currents in the power supply lines of multi-apartment houses allows to optimize the volume of heat losses in networks. The article presents the results of statistical analysis of instantaneous values of power consumption of the group of household consumers on the example of the 54-apartment house. On the basis of previous research in the field of monitoring and forecasting of data traffic in networks, data transmission, and also taking into account the unity of the nature of consumption of various resources by man in the course of its daily activities, the author suggests a hypothesis about the presence of regularities in the dynamics of power consumption. During the preparation of the experiment the developed system "Energy", allowing to monitor values of current for short time intervals with recording of the measurements into the database in real time. It is shown that the statistical distribution of the received value satisfies a log-normal function with easily controlled parameters. Monitoring enables the detection of unauthorized connection of consumers, problems in the contact switches, leakage currents in faulty insulation. Compensation short-term high values of a current source located close to consumers can significantly reduce heat loss in the power supply lines.

Keywords: losses in transmission lines, energy efficiency, log-normal distribution, a dynamic energy consumption monitoring, geographically-distributed power generation.

В настоящее время в нашей стране сложилась острая необходимость переосмысления традиционных подходов в повышении энергоэффективности производств и сферы жилищно-коммунальных услуг. Профессиональным сообществом из года в год обсуждаются цифры потерь при эксплуатации крайне изношенного оборудования и коммуникаций в системах централизо-

ванного теплоснабжения жилых микрорайонов и электрораспределительных сетях. Указ Президента РФ от 4 июня2008 г. N 889"О некоторых мерах по повышению энергетической иэкологической эффективности российской экономики" нацелен на«снижение к 2020 году энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40 процентов по сравнению с 2007 годом».

На момент принятия Указа в 2008 годудля вывода экономики на целевые показатели энергоэффективности необходимо было обеспечивать средний темп снижения энергоемкости ВВП не менее чем 4,32% в год. Однако, как заявил на форуме ООН «Устойчивая энергетика для всех» первый замминистра энергетики России А.Л. Текслер:«За последние семь лет Россия снизила энергоемкость ВВП на 5,61%, при этом актуальной задачей для страны является снижение этого показателя к 2020 году на не менее чем 40%».

Данные А.Л. Текслера означают, что на текущий момент выполнение Указа Президента потребуют темпов снижения энергоемкости ВВП в период до 2020 года на уровне 9% в год, что невозможно при стандартных подходах и не имеет мировых прецедентов. Между тем необходимо продолжить поиск методологических и технологических решений, позволяющих ускорить снижение энергоемкости предоставления услуг населению и производственных процессов. Модернизация основных фондов потребует времени и колоссальных материальных затрат. В тоже время сокращение непроизводительных потерь электроэнергии при передаче в электросетях, достигающих в некоторых сегментах до 30%, интеллектуализация процессов распределения в сетях передачи и потребления вполне посильная задача.

С целью поиска нетрадиционных решений в области сокращения потерь при транспортировке электроэнергии обратимся к опыту работы с информационным трафиком в сетях передачи данных. Основываясь на результатах исследований [1,2] следует ожидать, что распределение объемов электроэнергии, так же как и информационного трафика, агрегированного с определенным уровнем, на коротких интервалах работы сети (Рис.1), имеет характер логарифмически-нормального закона.

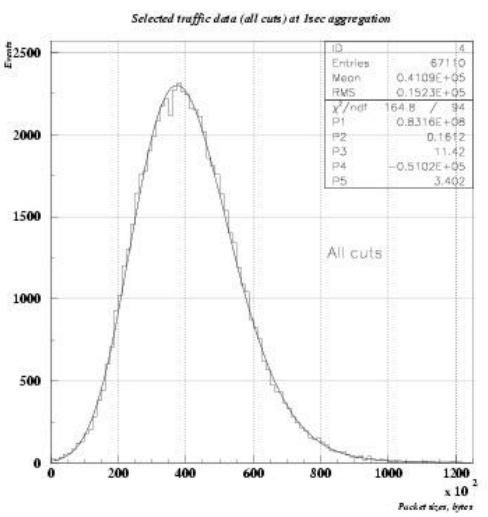


Рис.1 Логарифмически-нормальное распределение отобранных интервалов стабильного состояния системы

Однако, как показано ранее [3],в течении длительной работы сети передачи данных (несколько часов) наблюдается более сложная структура характеристик временных рядов, обусловленная изменениями интенсивности и качественных характеристик потока данных. Эти изменения связаны с вариациями сетевой активности различными группамипользователей, автоматизацией процессов изменения топологии сети на маршрутизаторах при балансировки загрузки линий связи, пороговыми значениями загрузки процессоров на сетевых узлах и т.д.

В тоже время небольшие временные интервалы устойчиво демонстрируют логарифмически-нормальные распределения. Изменения во внутренней динамике системы происходят скачкообразно, причем последующий временной ряд также отвечает логарифмически-нормальному закону,

но с другими параметрами агрегирования. Таким образом, любые возмущающие воздействия, происходящие внутри локальной сети, такие, как выход из строя сетевого устройства, линии передачи данных, проведение сетевой атаки – приводят к изменению параметров динамики потока.

На примере 32 часового фрагмента информационного трафика можно увидеть множество скачкообразных изменений во внутренней структуре потока данных.Система находилась в определенном стабильном состоянии 237 интервалов времени, продолжительностью более 10 секунд, 63 – более чем 1 минуту, 25 – более чем 5 минут, 6 – более чем 30 минут, 1 – более чем 2 часа (Рис. 2).

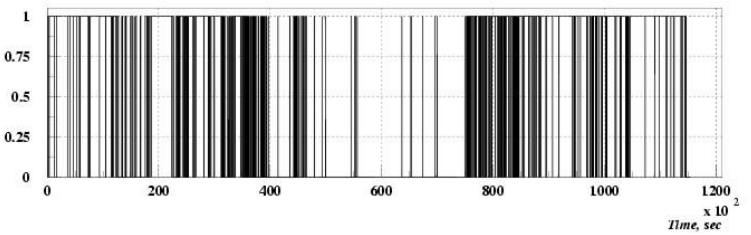


Рис. 2 Временная диаграмма границ резкого изменения внутреннего состояния системы

Следует заметить, что трафик магистрального сегмента сети передачи данных на протяжении периода наблюдения находился в определенном стабильном состоянии около 18,5 часов, что составляет 58 % общего времени. Ночной период времени также характеризуется наличием периодов стабильного состояния общей длительностью 6 часов 50 минут или 70 % ночного времени.

Основываясь на результатах, полученных при анализе трафика сегмента сети передачи данных, представляется обоснованным предположение о возможном наличии аналогий при трансляции объемов передаваемой электрической энергии в рамках существующих линий электропередачи.

Предположение основывалось на соображении о единстве природы потребления информации и электроэнергии человеком в рамках своей бытовой и производственной деятельности.

Если предположение верно, то логарифмически-нормальное распределение кратковременных значений потребления электроэнергии определяет наличие длинного «хвоста» функции, где сосредоточено относительно небольшое количество значений с амплитудами потребляемого тока, многократно превышающими средние значения.

Именно эти интервалы времени определяют требования к выделяемой электроснабжающей организацией предельной мощности потребления, диаметру проводников питающих кабелей, мощности трансформаторов на подстанциях и т.д. Компенсация потребностей пользователей на этих коротких временных участках за счет местных источников генерации и хранения электроэнергии позволила бы существенно увеличить возможности уже существующих сетей электроснабжения и снизить требования к сетям вновь возводимых объектов.

С целью получения объективных данных для проверки гипотезы был сформулирован перечень требований для постановки эксперимента по мониторингу мгновенных значений потребления электрической мощности группой пользователей:

- учитывая задачу по оптимизации потребления электроэнергии в рамках наиболее широко распространённого объекта – типового многоэтажного дома – выбор средств для съема данных можно ограничить мощностью в 100 – 150 кВт;
- общее время непрерывного мониторинга объёмов потребления можно ограничить 3 сутками, учитывая достаточно высокую стабильность ежесуточного потребления электроэнергии населением на бытовые нужды;
- время агрегирования потребляемой электрической мощности должно быть соизмеримо с вероятностной характеристикой включения-выключения бытового оборудования в раках небольшой группы домохозяйств и может быть принято равным 1 секунде.

Исходя из выбранных критериев, был проведен анализ существующего на рынке оборудования для измерения потребляемой мощности. Учитывая необходимость агрегации длительностью не более 1 секунды, требования получения данных в цифровом формате и необходимостью

записи большого количества значений за весь период измерений, было принято решение о необходимости разработки специализированного программно-аппаратного комплекса.

В ходе подготовки к постановке эксперимента был введен в эксплуатацию программно-аппаратный комплекс «Энергия» (Рис. 3) включающий:

- датчик измерения силы тока с разборным ферритовым сердечником, позволяющим установку датчика на существующие вводные фидеры сети распределения электроэнергии относительно большого диаметра;
- блок вычислительного устройства, включающий стандартный чип аналого-цифрового преобразователя, применяемый в широко используемых счетчиках электроэнергии;
- контроллер на основе модульного микропроцессорного вычислителя с разработанным программным обеспечением;
- модуль подключения к локальной сети Ethernet с интерфейсом 100BaseTX;
- программное обеспечение записи получаемых по сети замеров мгновенных значений потребления электроэнергии, функционирующее на основе сервера с предустановленной базой данных SQL-server.

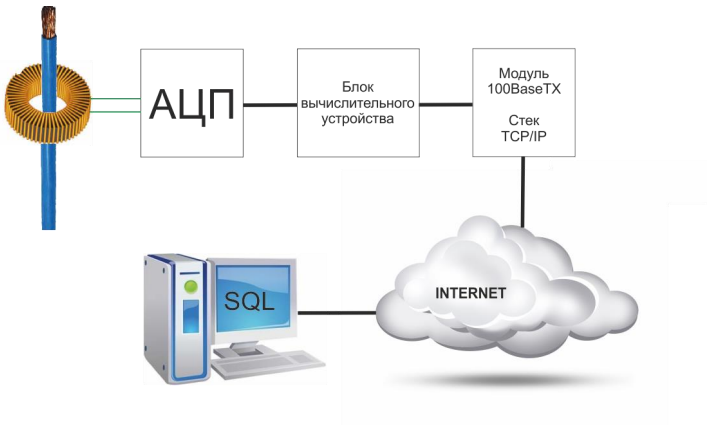


Рис. 3. Программно-аппаратный комплекс «Энергия»

В качестве объекта для исследования структуры электропотребления выбран одноподъездный 9-и этажный многоквартирный жилой дом 2009 года ввода в эксплуатацию, спроектированный на 54 квартиры с наличием одного лифта. Относительно небольшой период эксплуатации дома гарантирует использование жителями в большинстве случаев современного бытового оборудования и минимальное количество не заселенных квартир.

Мониторинг мгновенных значений тока организован на вводе фидера электроснабжения в цокольном этаже здания с установкой на кабель датчика тока и интегрированием значений на уровне вычислительного устройства. Погрешности измерений, связанных со способом установки датчика тока поверх изоляции провода, влияют на все полученные значения одинаковым образом и в расчет не принимались.

Для пересчета количества формируемых стандартным чипом импульсов ввеличинупотребляемой домом электрической мощности используется известный неизменяемый коэффициент. Эта величина также не влияет на динамику результатов анализа, поэтому в расчетах используются условные единицы - количество полученных импульсов. Пакеты данных, содержащие условные единицы замеров тока транслировались по высокоскоростным каналам информационно-образовательной сети города Дубны с записью на сервере, установленном в вычислительном центре государственного университета «Дубна».

Гистограмма мгновенных значений потребляемой мощности, полученных в период с 22 по 23 октября 2015 года, представлена на Рис. 4.

На гистограмме представлены амплитуды значений потребляемого электрического тока, полученные в 12 часовой период с 12:00 по 24:00. Количество импульсов на выходе чипа аналого-цифрового преобразователя подсчитаны в течении периода агрегирования, равного 1 секунде.

На всем временном отрезке периода измерений наблюдаются кратковременные всплески значений потребляемого многоквартирным домом тока в 3-4 раза превышающие средние значения потребления. Из числа произведенных замеров, собранных на протяжении всего времени мониторинга с общим количеством более 43 тыс. измерений только 360 из них имеют амплитуду в 3 раза и более превышающую среднее значение потребляемого тока. Кратковременные всплески значений связаны, видимо, с пусковыми токами двигателей лифта и бытового оборудования – холодильников, стиральных машин и т.д. Для ночного периода характерно значительно меньшее количество всплесков.

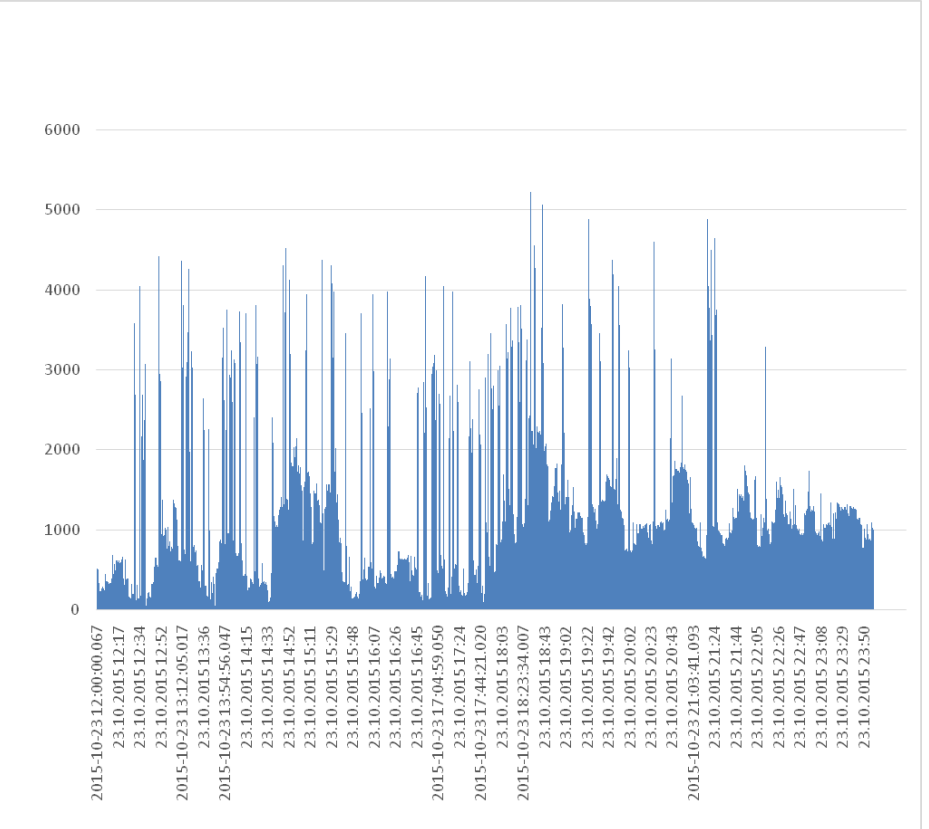


Рис. 4 Ряд замеров мгновенных значений потребляемой мощности

Полученная таким образом информация о структуре потребления электроэнергии многоквартирным домом, позволяет произвести дальнейшую обработку методом статистического анализа.

Следующая гистограмма иллюстрирует распределение количества замеров значений силы тока на питающем фидере дома. Значенияагрегированы с шагом 100 условных единиц от 0 до 3900 импульсов преобразователя (Рис. 5)

Как и ожидалось, гистограмма демонстрирует классическое логарифмически-нормальное распределение с «хвостом» по шкале объемов передаваемой мощности от 1500 до 3900 единиц.Количество секундных интервалов времени, где амплитуды силы тока в кабеле,питающем многоквартирный дом,превышают средние значения более чем в 3 раза мало и составляет менее 0,8% от общего количества замеров. При этом объем переданных в этих интервалах электрической мощности составляет чуть более 4,1% от всего потребления дома за исследуемый период. Количество же тепла, выделяемое в проводниках кабеля в пиковые интервалы, превышает средне-интервальное значение в 10-25 раз.

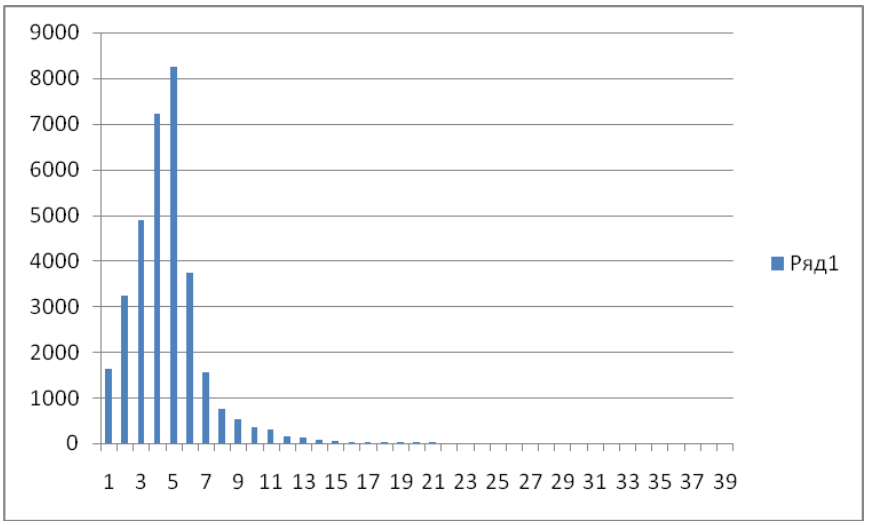


Рис. 5 Логарифмически-нормальное распределение значений силы тока на питающем фидере многоквартирного дома

Другими словами, солнечная батарея со средней генерацией около 3 кВт электрической мощности, либо батарея конденсаторов, расположенные в непосредственной близостиот потребителя способныполностью компенсировать кратковременные всплески потребления дома, исключить воздействие больших значений тока на разогрев проводников кабеля, а при массовом внедрении в городских микрорайонах - существенно снизить потери при передаче электроэнергии по высоковольтным линиям.

Установка автономных систем непрерывного мониторинга мгновенных значений электропотребления многоквартирного дома,наряду с оптимизацией перетоков мощности, позволяет динамически определять проблемы в работе внутренней электросети дома,например, с повышенными токами утечки на сегментах электросети дома с плохой изоляцией, а также подключение промышленного оборудования с большим электропотреблением. Таким образом, ведение динамического мониторинга позволяет реализовать множество сценариев автоматизированного купирования различных проблем до наступления значимых последствий.

На Рис.6 показана гистограмма с двумя ярко выраженными логарифмически-нормальными распределениями.

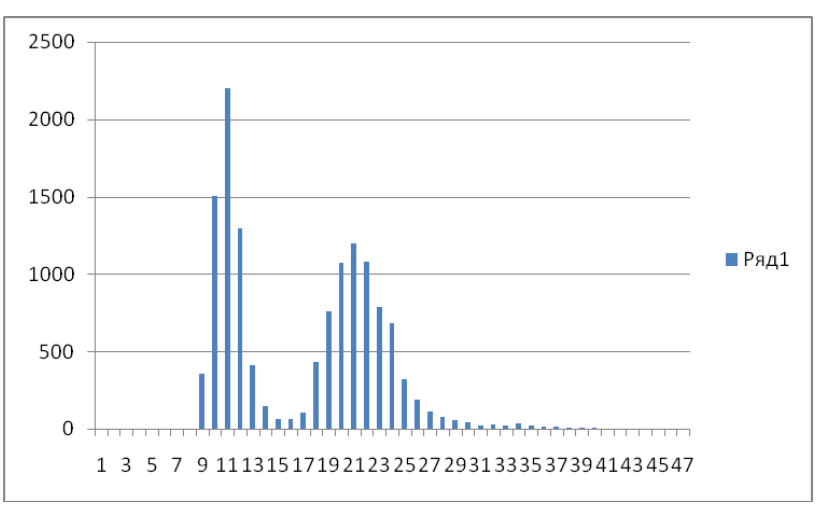


Рис. 6 Логарифмически-нормальное распределение с подключением оборудования бетономешалки

Совершенно очевидно, что наряду с обычной работой бытовых приборов появился дополнительный крупный потребитель электроэнергии, логика работы которого существенно отличается. В данном случае мы наблюдаем отсутствие интервалов с низким электропотреблением, а в области больших значений появился второй максимум функции, так же отвечающий логарифмически-нормальному закону.

Наличие длинных «хвостов» гистограммы, где сосредоточены небольшое количество временных периодов со значительными от 1500 до 4700 единиц значениями тока, позволяет сделать следующие выводы:

- внедрение небольших по объему накопителей электроэнергии на основе конденсаторных батарей и систем альтернативной генерации непосредственно в точках потребления позволяет существенно сократить пиковые токи и, соответственно, тепловые потери в линиях электропередач;
- существует возможность снизить вероятность перегрева проводников и контактов переключателей и, соответственно, пожаров и коротких замыканий;
- экстраполяция характера электропотребления на уровень территориально-распределенного расположения коттеджей малого поселения, оборудованных источниками альтернативного электропитания, позволяет сделать вывод о возможности обмена мощностью домохозяйствамидлякомпенсации пиковых значений тока;
- средние значения потребления группы домохозяйств с возможностью перераспределения генерируемой мощности позволяет существенно снизить требования к объемам генерации в каждом из отдельно взятых домохозяйств, что снижает стоимость первоначальных затрат на инсталляцию автономной системы электроснабжения малого поселения до приемлемого уровня.

Дальнейшие исследования в области методов и алгоритмов анализа структуры мгновенных значений электропотребления позволяют осуществлять прогнозирование необходимых объемов генерации электроэнергии в последующих периодах, обеспечивать снижение значений токов в распределительной сети и, как следствие, применить дешевые материалы проводников линий электроснабжения с относительно низкой электропроводностью.

Библиографический список

1. «On the log-normal distribution of network traffic» by I. Antoniou at all, Physica D 167(2002)72-85,

2. Система сбора, анализа и управления сетевым трафиком фрагмента сети ОИЯИ на примере подсети университета «Дубна»: Препринт ОИЯИ, Д11-2001-266. / Васильев П.М., Иванов В.В., Кореньков В.В., Крюков Ю.А., Купцов С.И. Дубна, 2001. 11 С.

3. Основные принципы обеспечения безопасности локальной сети на основе ССАУ «Трафик»: Препринт ОИЯИ, Д11-2002-292/ Васильев П.М., Иванов В.В., Кореньков В.В., Крюков Ю.А., Купцов С.И. Дубна, 2002. 28 С.

Мироненко И.Г.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

Введение

Объекты микроволновой техники «бесконечно» разнообразны. Поэтому универсальные программы обречены на «неоптимальность». Затраты машинного времени и погрешность расчета для конкретной инженерной задачи при «универсальном» подходе могут быть неоправданно завышенными. Магистр, специализирующийся в области проектирования устройств СВЧ, должен уметь поставить задачу проектирования и решить ее в рамках метода, отвечающего, в некотором смысле, оптимальным требованиям. Все задачи в области микроволновой техники, кроме, разумеется, "академических", сводятся к численному анализу. В свою очередь, численный анализ, выполненный в рамках метода частичных областей, вариационного или метода конечных элементов, сводится к системе линейных алгебраических уравнений. Решение ее дает искомый результат. Без понимания существа методов может возникнуть соблазн получить «точный» результат, наращиванием размерности системы уравнений и использования возрастающих возможностей специализированных компьютерных программ и вычислительных возможностей компьютеров. Для некоторых задач такой путь может быть вполне оправдан, для других задач следует искать другие подходы, другими словами, искать собственные решения. Но это возможно только в том случае, если есть знание фундаментальных закономерностей теории поля, что суть знание физических явлений, понимание математической стороны численной модели и навыки решения.

1. Основы проекционного метода анализа линий передачи

1.1. Ортогональные ряды

Материал этого раздела, на первых порах, может показаться сугубо формальным и «оторванным» от задач электродинамики, которые нам предстоит решать в дальнейшем. В действительности же все, о чем пойдет речь либо частично известно из других дисциплин (математики, теории поля), либо близок в своей сущности к инженерным задачам электродинамики.

Вспомним определение ортогональных функций. Пусть функция U определена в области V. В этой же области определена бесконечная система функций U_1, $U_2 \ldots U_n \ldots$ (в общем случае комплексных) и скалярное произведение функций. Вид скалярного произведения наиболее часто определен в виде интеграла по области определения V от произведения произвольной пары комплексно сопряжённых функций.

$$(U_i U_j) = \int_V U_i U_j^* dv .$$

Для некоторых систем скалярное произведение может быть определено в виде $(U_i U_j) = \int_V U_i \sigma U_j^* dv$. где σ - функция координат, называемая весом. Это определение скалярного произведения, как и сама система функций, в известном частном случае относится к бесконечной системе тригонометрических функций – синусов и косинусов кратных гармоник. Скалярное произведение в этой системе функций определено как интеграл на периоде основной гармоники, от произведения пары функций из бесконечного ряда. Синусы и косинусы могут быть заменены на экспоненциальные функции на основании формулы Эйлера. В этой системе функций в скалярном произведении участвуют комплексно-сопряженные функции.

Скалярное произведение функции самой на себя называют квадратом нормы

$$(U_i U_i^*) = \int_V (U_i)^2 dv .$$

Наиболее важные следствия проистекают от ортогональной системы функций, для которой выполняется условие

$$(U_m U_n^*) = \begin{cases} 0 & при \;\; m \neq n \\ 1 & при \;\; m = n \end{cases}$$

Такая система функций называется ортонормированной (ее норма равна 1). По ортонормированной системе функций можно провести разложение в ряд функции U

$$U = \sum_{m=0} a_m U_m .$$

Вполне понятно, что подобное представление можно записать для произвольной функции по произвольной системе функций. Однако, только в ортогональной системе можно определить правило вычисления коэффициентов разложения. Другими словами – определить правило разложения функции в ортогональном базисе. Напомним это правило. Умножим левую и правую часть разложения на функцию U_n^* из ортогонального базиса и проинтегрируем по области определения

$$\int_V U U_n^* dv = \sum_{m=0} a_m \int U_m U_n^* dv .$$

В силу ортогональности системы функций U_m в правой части этого соотношения останется одно слагаемое с номером m=n и при норме равной единице, получим правило определения коэффициентов разложения

$$a_n = \int_V U U_n^* dv .$$

Из курса математики и радиотехники известно, что разложение функции по ортонормированному базису называют рядом Фурье. Ряд Фурье по фундаментальной переменной – времени для периодической функции в радиотехнике называют тригонометрическим рядом Фурье.

2.2. **Численная схема решения уравнений Максвелла методом Галеркина**

Уравнения Максвелла можно преобразовать к дифференциальному уравнению второго порядка относительно волновых переменных. Например, гармонический векторный потенциал $rot\vec{A} = \mu_0 \vec{H}$ для линий передачи может быть определён в виде $\vec{A} = \vec{e}_z A e^{j(\omega t - \gamma z)}$ и с помощью уравнений Максвелла можно получить, что

$$\nabla_\perp^2 A + \chi^2 A = \frac{\mu_0}{j}$$

где $\nabla_\perp^2$ - лапласиан по поперечным координатам, $\chi^2 = k^2 - \gamma^2$, $k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$, j - можно рассматривать как ток возбуждающий поле в линии.

Это уравнение можно переписать придав ему вид в операторной форме

$$\hat{L} A = \frac{\mu_0}{j},$$

где оператор $\hat{L} = \nabla_\perp^2 + \chi^2$.

Это уравнение для волнового скаляра, поэтому заменим A произвольным скаляром U, получим

$$\hat{L} U = f .$$

В таком виде уравнение теряет электродинамическую «окраску» и может быть истолковано в самом общем смысле, как дифференциальное уравнение в частных производных с постоянными коэффициентами с «возбуждающей» силой в правой части.

Рассмотрим решение уравнения при помощи приемов проектирования в функциональном пространстве. Уравнение при известном точном решении можно представить в виде $\hat{L} U - f = 0$. Допустим, что мы выбрали ортонормированный базис $U_1 U_2 ... U_N$, в котором функция U может

быть разложена в ряд Фурье $U=\sum_{m=1}^{\infty}a_mU_m$. Если U - точное решение, то любая функция из базиса ортогональна к «нулю», т.е. скалярные произведения $(\hat{L}U-f,U_n)=0$. Иначе говоря, коэффициенты ряда Фурье равны нулю, если U - точное решение. Допустим, что искомая функция U представлена отрезком ряда Фурье или суммой вида $U=\sum_{m=1}^{N}a_mU_m$. В таком представлении $\hat{L}\sum_{m=1}^{N}a_mU_m-f\neq 0$. Левая часть этого соотношения называется невязкой. Суть метода Галеркина сводится к требованию ортогональности невязки к базису $(U_1U_2...U_N)$. Формальное обоснование этого предположения заключено в том, что при $N\to\infty$ невязка стремится к нулю и, естественно, выполняется условие ортогональности (еще раз заметим, что с «нулем» ортогональность выполняется всегда). Таким образом, следуя методу Галеркина запишем

$$(\hat{L}\sum_{m=1}^{N}a_mU_m-f,U_n)=0$$

Полученное соотношение, представляет собой систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения a_n. Очевидно, что при конечном значении N скалярное произведение невязки и базисных функций не равно нулю, но стремится к нулю при $N\to\infty$. Другими словами, метод Галеркина основан на редуцировании бесконечной системы уравнений, решение которой дает приблизительное (неточное) значение искомой функции U, которое тем ближе к точному, чем N «ближе» к бесконечности.

Образуем систему уравнений в явном виде. Для этого преобразуем предыдущее соотношение к виду

$$\sum_{m=1}^{N}a_n\left(\hat{L}U_m,U_n\right)=\left(fU_n\right).$$

Индекс $n=1,2...N$ определяет номер строки, а m - номер столбца в матрице системы уравнений

$$\begin{gathered}
a_1\left(\hat{L}U_1,U_1\right)+a_2\left(\hat{L}U_2,U_1\right)+...+a_N\left(\hat{L}U_N,U_1\right)=\left(f,U_1\right)\\
a_1\left(\hat{L}U_1,U_2\right)+a_2\left(\hat{L}U_2,U_2\right)+...+a_N\left(\hat{L}U_N,U_2\right)=\left(f,U_2\right)\\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
a_1\left(\hat{L}U_1,U_N\right)+a_2\left(\hat{L}U_2,U_N\right)+...+a_N\left(\hat{L}U_N,U_N\right)=\left(f,U_N\right)
\end{gathered}$$

Решением этой системы является вектор $a(a_1,a_2...a_N)$. Систему уравнений называют проекционной моделью Галеркина.

Рассмотренная выше процедура Галеркина дает связь коэффициентов разложения с «возмущающей силой», что отражено неоднородной системой уравнений. Значительный интерес представляют задачи на собственные значения. В них $f=0$ и решения представляют собой собственные функции, которые можно рассматривать как реакцию на «нулевую» возмущающую силу. Оператор $\hat{L}=\nabla_\perp^2+\chi^2$, поэтому при $f=0$ имеем $\nabla_\perp^2U=-\chi^2U$. Придадим этому уравнению вид $\hat{A}U=\lambda qu$, где $\hat{A}$ - линейный дифференциальный оператор, λ - параметр задачи, q - оператор веса (это или функция или константа). (Переход к частной задаче дает $\hat{A}=\nabla_\perp^2,\lambda=-\chi^2,q=1$). В результате имеем $\hat{A}U-\lambda\hat{q}u=0$. Решение этой задачи может быть получено методом Галеркина, который приводит к однородной системе линейных алгебраических уравнений вида

$$\sum_{m=1}^{N}a_m\left[\left(\hat{A}U_m-\lambda qU_m,U_N\right)\right]=0.$$

Здесь круглые скобки обозначают скалярные произведения. Запишем матрицу системы уравнений в явном виде

$$\begin{bmatrix}
\left(\hat{A}U_1-\lambda qU_1,U_1\right)\left(\hat{A}U_2-\lambda qU_2,U_1\right)..\left(\hat{A}U_N-\lambda qU_N,U_1\right)\\
\left(\hat{A}U_1-\lambda qU_1,U_2\right)\left(\hat{A}U_2-\lambda qU_2,U_2\right)..\left(\hat{A}U_N-\lambda qU_N,U_2\right)\\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
\left(\hat{A}U_1-\lambda qU_1,U_N\right)\left(\hat{A}U_2-\lambda qU_2,U_N\right)..\left(\hat{A}U_N-\lambda qU_N,U_N\right)
\end{bmatrix}$$

В сжатой форме систему уравнений можно записать в виде

$$\hat{B}\vec{a}=0,$$

где $\hat{B}$ - матрица с элементами ($\hat{A}U_m - \lambda q U_m, U_N$), $\vec{a}(a_1, a_2 ... a_N)$. Однородная система уравнений имеет решение, если определитель матрицы равен нулю, $\det \hat{B} = 0$. Это в свою очередь есть уравнения для λ. Количество значений λ зависит от размерности матрицы. λ - называют собственными значениями матрицы $\hat{B}$. Каждому значению λ соответствует решение системы уравнений в виде численных значений $(a_1, a_2 ... a_N)$, которые в свою очередь определяют собственную функцию рассматриваемой задачи.

Вернемся к электродинамической постановке задачи. Собственные значения задачи это возможные значения χ^2. В свою очередь $\chi^2 = k^2 - \gamma^2$, где γ - неизвестная постоянная распространения. Таким образом, собственные значения в электродинамической трактовке это возможные значения постоянной распространения, каждому из которых соответствует собственный мод электромагнитной волны в линии передачи.

2. Методы вариационного исчисления в задачах электродинамики

2.1. Функционалы

Во многих задачах механики, электростатики, электродинамики и т.д. важную роль играют переменные величины, называемые функционалами. Говорят, что задан функционал, если каждой функции из некоторого класса поставлено в соответствие определенное число. Таким образом, можно сказать, что функционалы это функции, в которых роль независимого переменного играют функции.

В теории функционалов наиболее разработаны методы нахождения экстремальных значений функционалов. Этот раздел в теории функционалов называют вариационным исчислением. Вариационное исчисление играет важную роль в различных разделах физики. Исторически одной из первых задач на экстремум функционала стала задача о минимуме времени движения между двумя точками, лежащими не на вертикали, под действием силы тяжести. Можно привести много примеров на экстремум функционалов, которые имеют ясный геометрический или физический смысл. Например, среди кривых соединяющих две данные точки, найти ту, которая имеет наименьшую длину, среди всех замкнутых кривых, имеющих заданную длину, найти ту, которая ограничивает наибольшую площадь, и т.д.

В развитии вариационного исчисления эти задачи или им подобные сыграли очень важную роль. Позже возникло понимание того, что всем основным уравнениям физики, отвечают определенные функционалы, экстремум которых достигается на решенияхэтих уравнений. Они называются экстремалями. Другими словами экстремаль – функция (в простейшем плоском случае кривая), на которой функционал достигает экстремума. Основной задачей вариационного исчисления является поиск уравнения экстремалей для различных функционалов. Между анализом функций и вариационным анализом есть много формальных соответствий. Одно из них состоит в том, что дифференциал функционала $\delta\Phi$ рассматривается как главная линейная часть приращения при достаточно малом изменении переменной, а необходимым условием экстремума является обращение $\delta\Phi$ в нуль на экстремале.

Теперь рассмотрим способ построения функционала для задачи $\hat{L}u = f$, которую мы рассматривали в методе Галеркина. Напомним, что $\hat{L}$ - оператор задачи, u - решение, а f - вынуждающая сила. Выберем произвольные функции v и w из области определения оператора $\hat{L}$ и введем в рассмотрение оператор $\tilde{\hat{L}}$ сопряженный $\hat{L}$. Он вводится соотношением

$$\left(\hat{L}W, \upsilon\right) = \left(W, \tilde{\hat{L}}\upsilon\right).$$

Здесь скобки означают скалярное произведение.

Введем сопряженную задачу.

$$\tilde{\hat{L}}\tilde{u} = g,$$

где g – самостоятельная величина, не связанная с f прямой задачи. Построим функционал

$$\Phi(w, \upsilon) = \left(\hat{L}w, \upsilon\right) - (f\upsilon) - (g, w).$$

Покажем, что функционал $\Phi(w,\upsilon)$ экстремален на решениях u и $\tilde{u}$ прямой и сопряженной задачи. Для этого найдем вариацию функционала $\delta\Phi(w,\upsilon)$, как главную линейную часть приращения $\Phi(w,\upsilon)$ при изменении υ и w на величине $\delta\upsilon$ и δw. Получим

$$\delta\Phi(w,\upsilon)=\left(\hat{L}\delta w,\upsilon\right)+\left(\hat{L}w,\delta\upsilon\right)-\left(f,\delta\upsilon\right)-\left(g,\delta w\right).$$

Первое слагаемое преобразуем к виду

$$\left(\hat{L}\delta w,\upsilon\right)=\left(\tilde{\hat{L}}\upsilon,\delta w\right)$$

и перепишем

$$\delta\Phi(w,\upsilon)=\left(\hat{L}w,\delta\upsilon\right)-\left(f,\delta\upsilon\right)+\left(\tilde{\hat{L}}\upsilon,\delta w\right)-\left(g,\delta w\right).$$

В этом соотношении, на основании определения скалярного произведения, слагаемые могут быть попарно объединены. Тогда

$$\delta\Phi(w,\upsilon)=\left(\hat{L}w-f,\delta\upsilon\right)+\left(\tilde{\hat{L}}\upsilon-g,\delta w\right).$$

Условием экстремума функционала является обнуление приращения функционала $\delta\Phi(w,\upsilon)$.

В силу произвольности приращений $\delta\upsilon$ и δw, обнуление $\delta\Phi(w,\upsilon)$ приводит к паре уравнений, которым должны удовлетворять функции w и υ, на которых функционал стационарен. Эти уравнения следующие

$$\left(\hat{L}w-f\right)=0 \quad \text{и} \quad \left(\hat{L}\upsilon-g\right)=0$$

Таким образом, экстремальные значения функционал $\Phi(w,\upsilon)$ принимает на решениях исходной задачи.

2.2. Прямой метод вариационного исчисления. Метод Ритца

Основой построения прямых методов вариационного исчисления является построение минимизирующих последовательностей функций. Одним из наиболее распространенных методов является метод Ритца, который состоит в следующем. Пусть ищется минимум функционала $\Phi(w)$.

Допустим, что есть некоторая последовательность функций $u_1,u_2,...,u_n,...$, линейная комбинация которых $w=a_1u_1+a_2u_2+...+a_Nu_N$ представляет собой искомую функцию минимизирующую функционал $\Phi(w)$. Поставим задачу: при заданном N выбрать коэффициенты $a_1...a_N$ так, чтобы значение функционала $\Phi(a_1u_1+a_2u_2+...+a_Nu_N)$ было возможно меньше. Это задача о нахождении минимума функции от N-переменных, коими являются коэффициенты минимизирующей последовательности $a_1...a_N$. Она несравнимо более простая, чем нахождение минимума функционала, которая приводит к дифференциальным уравнениям. Таким образом, при каждом N мы получим соответствующий минимум функционала μ_N. При выполнении условия полноты последовательности функций $u_1,u_2,...,u_n,...$, предел $\lim\limits_{N\to\infty}\mu_N=\mu$, где μ - минимум функционала. Доказательство этого утверждения мы не приводим. Быстрота сходимости метода Ритца $(\mu_N\to\mu)$ для конкретной вариационной задачи зависит как от самой задачи, так и от выбора систем функций $u_1,...,u_N$.

Рассмотрим с формальной стороны метод Ритца. Представим $w=\sum\limits_{n=1}^{N}a_nu_n$, $\upsilon=\sum\limits_{m=1}^{N}b_mu_m$ и внесем их в выражение для функционала

$$\Phi=\left(\hat{L}\sum_{n=1}^{N}a_nu_n,\sum_{m=1}^{N}b_mu_m\right)-\left(f,\sum_{m=1}^{N}b_mu_m\right)-\left(g,\sum_{n=1}^{N}a_nu_n\right).$$

Теперь Φ представляет собой функцию переменных $a_1,...a_N,b_1,...b_N$.

Как известно, минимум функции достигается при условии обращения всех частных производных $\frac{\partial\Phi}{\partial a_n}$ и $\frac{\partial\Phi}{\partial b_m}$ в ноль. Ограничимся половиной этих условий, а именно, потребуем, чтобы

$$\frac{\partial\Phi}{\partial b_m}=0 \text{ при } m=1,2...N.$$

Преобразуем скалярное произведение двух сумм в Φ и запишем

$$\frac{\partial}{\partial b_m}\left[\sum_{m,n=1}^{N} a_n b_m\left(\hat{L}u_n, u_m\right) - \sum_{m=1}^{N} b_m\left(f, u_m\right) - \sum_{n=1}^{N} a_n\left(u_n, g\right)\right] = 0$$

Это соотношение эквивалентно СЛАУ, размерности N^2. В системе уравнений индекс m определяет номер строки, а n – номер столбца. Поэтому СЛАУ имеет вид

$$a_1\left(\hat{L}u_1, u_1\right) + a_2\left(\hat{L}u_2, u_1\right) + \ldots + a_N\left(\hat{L}u_N, u_1\right) = \left(f, u_1\right)$$

$$a_1\left(\hat{L}u_1, u_2\right) + a_2\left(\hat{L}u_2, u_2\right) + \ldots + a_N\left(\hat{L}u_N, u_2\right) = \left(f, u_2\right)$$

$$\ldots$$

$$a_1\left(\hat{L}u_1, u_N\right) + a_2\left(\hat{L}u_2, u_N\right) + \ldots + a_N\left(\hat{L}u_N, u_N\right) = \left(f, u_N\right).$$

Как мы видим метод Ритца приводит к той же системе алгебраических уравнений , как и метод Галеркина.

Заключение

Методы Галёркина и Ритца численного решения дифференциальных уравнений могут быть использованы в решениях задач электродинамики при корректном сведении уравнений Максвелла к дифференциальным уравнениям. Помимо этого необходимый ортогональный базис возникает в относительно небольшом числе задач, например, в задачах расчёта волноводов с частичным диэлектрическим заполнением. От этих ограничений свободен метод конечных элементов, который использует идеи Галёркина и Ритца. Однако, ограниченный объём работы не позволил его рассмотреть.

Муромцев Д.Ю.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшее профессиональное образование
«Тамбовский государственный технический университет»
crems@crems.jesby.tstu.ru

Экономия энергоресурсов является одной из важнейших проблем человечества. В связи с ростом цен на электроэнергию и топливо, усилением конкурентной борьбы между фирмами, производящими энергоемкое оборудование, транспортные средства и другие машины, а также учитывая сложность социально-экономической обстановки актуальность задач экономии и рационального использования энергоресурсов с каждым годом возрастает. Проблема экономии топливо-энергетических ресурсов занимает важное место в тематике работ научно-исследовательских организаций, проектных и промышленных фирм всех стран мира.

1. Энергетическая эффективность

Важнейшим условием конкурентоспособности энергопотребляемой продукции производственно-технического назначения и бытового потребления в настоящее время становится ее энергетическая эффективность. В соответствии со стандартами под эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов (энергоносителей) понимается экономически оправданное их использование при существующем уровне развития техники и технологий, соблюдение требований к охране окружающей природной среды.

Традиционно снижение энергетических затрат на производстве в процессах нагрева достигается за счет: а) повышения производительности технологического оборудования, уменьшения его простоев в рабочем состоянии; б) повышения надежности электротермических аппаратов; в) улучшения теплоизоляции [1 – 3].

В общем случае энергосбережение достигается реализацией научных, технических, экономических, производственных, а также организационных и правовых мер, направленных на эффективное использование ТЭР. В качестве ТЭР рассматривается совокупность природных и производственных энергоносителей, запасенная энергия, которых доступна для использования в хозяйственной и других видах деятельности при существующем уровне развития техники и технологии. Энергоносителями могут быть вещество в различных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твердом) или другие формы материи (поле, плазма и т.д.), запасенная энергия которых может использоваться в целях энергосбережения.

В настоящее время выделяют три основные группы показателей энергетической эффективности (ПЭЭ): 1) нормируемые ПЭЭ продукции, вносимые в паспорта и другую нормативную документацию; 2) ПЭЭ производственных процессов, вносимые в энергопаспорта предприятий; 3) показатели реализации энергосбережения.

Для характеристики технической, научной, экономической деятельности по энергоэффективности рекомендуется использовать следующие ПЭЭ:

– физическая экономия ТЭР, в том числе за счет нормирования энергопотребления и экономического стимулирования;

– снижение потерь ТЭР за счет оптимизации режимных параметров, внедрения автоматических систем энергосберегающего управления, приборов учета ТЭР и подготовки кадров;

– снижение энергоемкости производства продукции за счет структурной перестройки энергопотребления, использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, вторичных энергоресурсов, высокотехнологичного оборудования, отвечающего мировому уровню, и т.п.

2. Анализ и синтез энергосберегающего управления

Важным резервом снижения энергопотребления является оптимальное управление динамическими режимами с учетом изменяющихся состояний функционирования. Теоретические исследования показывают, что при оптимальном управлении снижение энергозатрат в динамических режимах достигает 20% и более при условии, что используются алгоритмы синтеза оптимального управления (ОУ) в реальном времени, реализуемые простыми и дешевыми микропроцессорными устройствами. Использование энергосберегающего управления наряду с экономией ресурсов повышает долговечность оборудования.

В большинстве случаев разработка алгоритмического обеспечения для систем оптимального управления, минимизирующих затраты энергии, расход топлива и других ресурсов, представляет собой сложное научно-техническое исследование. В каталогах алгоритмического и программного обеспечения фирм, поставляющих программные и технические средства для промышленной автоматизации (КРУГ, Техноконт, Трейс Моуд, Matlab, Siemens, Schneider Electrik, Omron и др.), отсутствуют сведения об алгоритмах, минимизирующих затраты энергии или расход топлива.

В существующих SCADA-системах и других программных средствах, используемых для проектирования систем автоматического управления и регулирования, предполагается стандартный набор алгоритмов: ПИ- и ПИД-регулирование, линейный квадратичный оптимальный регулятор, оптимальное быстродействие, нечеткий регулятор и некоторые другие, в которых не учитываются характерные для энергосберегающего управления ограничения, например, на лимит энергии или запас топлива. Ряд фирм в проспектах о своей продукции упоминают об энергосбережении и «мягком» пуске электродвигателей, однако используемые для этого алгоритмы не раскрываются и считаются ноу-хау фирмы.

Это объясняется следующим.

Во-первых, анализ задач оптимального управления (ЗОУ) с функционалом затраты энергии показывает, что даже в случае использования простейших моделей динамики в виде линейных дифференциальных уравнений третьего порядка при скалярном управлении число возможных видов функций оптимального управления (ОУ) более двадцати. Если объект, динамика которого описывается дифференциальным уравнением второго порядка, имеет два входа (простейшая MIMO-система), то число видов функций ОУ более сорока. Поэтому уже определение вида функции ОУ для задаваемого массива исходных данных представляет сложную задачу, такие задачи для многих энергоемких объектов еще теоретически не исследовались.

Во-вторых, в процессе реальной эксплуатации объекта происходят изменения режимов работы, требуемых значений выходных переменных, ограничений на переменные и т.п. Это требует оперативного пересчета управления, т.е. определения вида функции ОУ и ее параметров для новых исходных данных. Для такого пересчета ОУ в реальном времени необходима предварительно созданная база знаний.

В-третьих, для проектирования систем энергосберегающего управления часто приходится решать обратные задачи, например, определить при каких исходных данных решение ЗОУ существует, как надо изменить исходные данные, чтобы обеспечить требуемый запас практической устойчивости системы и т.п.

Под полным анализом ЗОУ понимается комплекс исследований, включающий: получение условий существования решения ЗОУ для любых задаваемых исходных данных; определение всех возможных видов функций ОУ (два вида функций $u_i^*(t), u_j^*(t)$ считаются различными, если они содержат разное число параметров или параметры функций рассчитываются с помощью разных соотношений); разработку алгоритма определения вида функции ОУ для задаваемого массива исходных данных; получение соотношений для расчета параметров всех возможных функций ОУ; получение формул для расчета траекторий изменения фазовых координат для всех видов функций ОУ, а также оценки значения функционала; получение соотношений для решения обратных задач (например, насколько надо изменить время $t_к$, чтобы решение задачи существовало) [4].

В качестве математического аппарата для выполнения полного анализа ЗОУ используется принцип максимума и метод синтезирующих переменных [5]. Применение метода синтезирую-

щих переменных (МСП) позволяет визуализировать ход и результаты решения как прямых, так и обратных задач управления. В основе МСП лежит идея сокращения размерности массива исходных данных за счет нормирования интервалов $[t_0, t_к], [u_н, u_в]$ и введения вектора синтезирующих переменных L, однозначно характеризующего вид и параметры функции ОУ. Переход от массива исходных данных R, размерность которого всегда больше $2n+5$, к вектору L размерности n значительно облегчает и ускоряет обработку информации в вычислительных процессах при анализе и синтезе ОУ (здесь n – размерность вектора фазовых координат z).

В процессе реальной эксплуатации объектов могут существенно изменяться компоненты модели ЗОУ $<M, F, S, O>$, например, вид модели динамики, вид функционала или стратегии, такие изменения будем называть изменениями состояний функционирования. Если при изменении значений массива R модель ЗОУ сохраняется, то пересчет управления происходит с использованием соотношений, полученных при полном анализе одной ЗОУ. В случае изменения компонентов «четверки» $<M, F, S, O>$ для расчета нового ОУ требуется переход к результатам полного анализа другой ЗОУ. Если на этапе разработки СЭУ выявлены все возможные ситуации при эксплуатации объекта и соответствующие модели ЗОУ, а также выполнен полный анализ для этих задач, то будем говорить, что выполнен анализ ЗОУ на множестве состояний функционирования (МСФ) [4]. Элементами этого множества, обозначим его $\mathcal{H}$, являются значения переменной состояния функционирования h. Конкретному значению h соответствует определенная модель ЗОУ в виде четверки. Изменения h в процессе эксплуатации системы могут переходить как в определенные, так и в случайные моменты времени.

Основные трудности, встречающиеся при решении задач энергосберегающего управления, заключаются в следующем.

Во-первых, вид функции энергосберегающего управления (ЭУ) динамическим режимом объекта зависит от большого числа факторов. К этим факторам прежде всего относятся вид и значения параметров модели динамики объекта, вид минимизируемого функционала (затраты энергии, расход топлива и др.), значения исходных данных задачи управления (границы изменения управления, начальное и конечное значения вектора фазовых координат и т.д.). Для большинства реальных объектов, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями второго и третьего порядков, число различных функций ЭУ составляет несколько десятков. Заметим, что два вида ЭУ считается различными, если расчет их параметров не может производиться с помощью одной вычислительной процедуры. Вследствие большого числа разных видов функций ЭУ применительно к одной задаче управления возникает проблема оперативного определения вида функции для задаваемого массива исходных данных.

Во-вторых, расчет параметров функции ЭУ как правило связан с решением системы сложных нелинейных уравнений. Эти системы уравнений для многих объектов пока еще не получены.

В-третьих, в процессе реализации рассчитанного ЭУ часто происходят непредвиденные изменения данных или условий задачи, связанных, например, с изменением модели динамики объекта, конечного значения вектора фазовых координат и т.п. В этом случае контроллер должен оперативно пересчитать ЭУ, т.е. определить новый вид функции и ее параметры.

В-четвертых, в задачах энергосберегающего управления часто содержатся специфические ограничения на управления и вектор фазовых координат. К таким ограничениям относятся интегральные ограничения на лимит энергии (запас топлива), скорость изменения управляющего воздействия, траектории изменения компонентов вектора фазовых координат и др.

В-пятых, многие энергопотребляемые объекты имеют нелинейные динамические характеристики. Теория энергосберегающего управления такими нелинейными объектами пока только начинает разрабатываться.

Перечисленные трудности носят общий характер для всех задач энергосберегающего управления. Кроме того, для каждого класса объектов (гибридные, многомерные) имеются свои особенности, осложняющие решение задачи.

3. Экспертная система «Энергосберегающее управление динамическими объектами»

Фреймы экспертной системы содержат полную информацию о результатах полного анализа ЗОУ [6-7].

Разработанная экспертная система позволяет оперативно решать следующие задачи синтеза энергосберегающего управления.

1. Синтез алгоритмического обеспечения контроллера с использованием результатов полного анализа модели ЗОУ. Например, применительно к модели $<M,F,Пр,O>$ эта задача может формулироваться следующим образом.

Задаются диапазоны возможных изменений параметров модели объекта $[a_{i\text{н}},a_{i\text{в}}],[b_{\text{н}},b_{\text{в}}]$, границ управляющих воздействий $[u'_{\text{н}},u''_{\text{н}}],[u'_{\text{в}},u''_{\text{в}}]$ временного интервала $[t'_0,t''_0],[t'_{\text{к}},t''_{\text{к}}]$ и концов траектории вектора фазовых координат $[z'_{i0},z''_{i0}],[z'_{i\text{к}},z''_{i\text{к}}]$. Требуется найти подмножество видов функций ОУ для указанных интервальных значений исходных данных, выделить соотношения для расчета параметров функций $u_i^*(t)$, проверки существования решения ЗОУ и решения обратных задач управления. По существу это задача разработки супервизора для интеллектуального контроллера.

2. Синтез ОУ в реальном времени (СРВ). Данная задача заключается в синтезе энергосберегающих управляющих воздействий при изменении состояний функционирования, т.е. решения ЗОУ3 на основе результатов анализа на МСФ. Математически задача СРВ формулируется следующим образом. Задается допустимое время $\Delta t_{\text{д}}$, которое удовлетворяет условиям: 1) вероятность изменения h за $\Delta t_{\text{д}}$ пренебрежимо мала; 2) функционирование СЭУ в течение $\Delta t_{\text{д}}$ при нескорректированном после изменения h управлении $u(t)$ не ведет к срыву терминального условия $z(t_{\text{к}})=z^{\text{к}}$ за исключением случая, когда изменение h происходит в момент $\theta=t_{\text{к}}-\Delta t_{\text{д}}$; 3) время $\Delta t_{\text{д}}$ должно быть достаточно для идентификации значения h; 4) время $\Delta t_{\text{д}}$ соответствует возможностям микропроцессора по быстродействию. Иногда, например, при имеющемся контроллере, могут задаваться также объем памяти и пакет микрокоманд микропроцессорного устройства.

Требуется разработать алгоритм, который при произвольных изменениях h на интервале $[t_0,t_{\text{к}}]$ (но таких, что при каждом значении h решение ЗОУ существует) за время $\Delta t_{\text{с}}=\Delta t_{\text{д}}-\Delta t$ позволяет определить вид и рассчитать параметры управления $u^*(\cdot/h)$, соответствующего новому значению переменной h, и может быть реализован при заданных технических характеристиках управляющего устройства, здесь $\Delta t-$ время, необходимое для расчета и установки скорректированного $u(\cdot/h)$.

3. Синтез гарантированного управления. Даная задача связана с синтезом управления в ЗОУ второго и четвертого классов, когда требуется получить управление, гарантирующее выполнение условия для конечного момента времени $t_{\text{к}}$ при неизвестном состоянии функционирования на интервале управления $[t_0,t_{\text{к}}]$. Здесь различают два случая: в первом значение $z(t_{\text{к}})$ задается точкой $z^{\text{к}}$ в n- мерном пространстве, во втором - областью $Z^{\text{к}}$.

4. Совмещенный синтез ОУ. В данной задаче задаются возможные виды модели объекта и массив исходных данных R, за исключением параметров объекта. Требуется за допустимое время идентифицировать модель объекта и затем определить вид и параметры функции ОУ.

5. Синтез квазиоптимального управления (КОУ). Данная задача часто связана с невозможностью плавно изменять ОУ по требуемому закону или со сложностью расчетов точного значения функции $u^*(t)$. В качестве вида КОУ $\tilde{u}(t)$ обычно рассматривается ступенчатая функция, которая с требуемой точностью или допустимым увеличением функционала аппроксимирует непрерывную функцию $u^*(t)$. Применение КОУ позволяет значительно упростить реализацию управляющих воздействий за счет небольшого числа фиксированных значений $u(t)$. Например, для электронагрева используются два нагревательных элемента, В этом случае $u(t)$ может принимать три значения 0 (оба элемента выключены), u_1 (один элемент включен) и u_2 (два эле-

мента включены). Число значений $\tilde{u}(t)$ может увеличиваться как за счет введения дополнительных элементов, так и за счет разных способов их включения (последовательное, параллельное, комбинированное).

4. Факторы эффекта энергосбережения

Эффект энергосбережения при использовании оптимального управления достигается за счет следующих факторов:

- реализация оптимальных траекторий изменения фазовых координат на всем временном интервале управления, например, для тепловых объектов оптимальная траектория изменения температуры обеспечивает сокращение временного участка с наибольшими потерями тепла в окружающую среду;
- оптимальное ведение динамических режимов при всех состояниях функционирования, т.е. в случае изменения модели динамики объекта или условий (исходных данных) задачи управления оперативно (в реальном времени) находится новое решение, и реализуются энергосберегающие управляющие воздействия для существующей ситуации;
- достижение задаваемого конечного значения вектора фазовых координат точно в требуемый момент времени, которое, в свою очередь, выбирается оптимальным;
- использование оптимальной стратегии реализации энергосберегающего управления (программной, позиционной или другой) для каждого состояния функционирования;
- замена обычных автоматических регуляторов энергосберегающими, которые устраняют значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии (расхода топлива);
- использование резервов своевременного отключения энергоносителей (например, за остаточного тепла разогретого аппарата);
- создание локальных и бортовых систем энергосберегающего управления на базе простых и дешевых микропроцессорных устройств.

Выводы

Краткое рассмотрение вопросов энергосберегающего управления ТО позволяет выделить некоторые перспективные направления для дальнейших научных исследований.

1. Совместное проектирование ТО и СЭУ с целью упрощения алгоритмического обеспечения (отодвинуть от границы областей видов ОУ).
2. Разработка специализированных МСх на основе использования КгМ, содержащих результаты полного анализа ЗОУ. Это позволит сократить время решения задач синтеза ОУ и удешевить СЭУ.
3. Создание «интеллектуальных» программных продуктов для автоматического вывода соотношений, используемых при полном анализе ЗОУ.
4. Разработка интеллектуальных контроллеров, которые в зависимости от сложившейся ситуации решают задачи выбора наилучшей стратегии реализации ОУ, вида минимизируемого функционала, изменяют условия исходной ЗОУ, если для них решение задачи не существует.
5. Использование виртуальных датчиков и комплексирования для оценки значений переменных, которые недоступны непосредственному измерению.

Для создания систем энергосберегающего управления требуется решить комплекс теоретических задач, основными из них являются:

– полный анализ задач оптимального управления для типовых моделей динамики энергоемких объектов, различных видов минимизируемых функционалов и стратегий реализации управляющих воздействий, ограничений на управления и фазовые координаты, встречающиеся в реальных условиях;

– анализ энергосберегающего управления машинами и аппаратами на множестве состояний функционирования, когда возможны изменения моделей объектов стратегий и функционалов;

– анализ энергосберегающего управления многомерными объектами;

– идентификация моделей динамических режимов, в том числе нелинейных и с временным запаздыванием по каналу управления, пригодных для использования в системах энергосберегающего управления.

Библиографический список

1. Аджиев, М. Э. Энергосберегающие технологии / М.Э. Аджиев. – М. : Знание, 1990. – 64 с.

2. Аракелов, В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В.Е. Аракелов, А.И. Кремер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 188 с.

3. Ятров, С.Н. Энергосберегающие технологии в СССР и за рубежом. Аналитический альбом / С.Н. Ятров. – М. : Машиностроение, 1991. – 288 с.

4. Муромцев, Ю.Л.Теоретические основы энергосберегающего управления: монография / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин. – М.: ЯНУС – К, 2010. – 288 с.

5. Муромцев, Д.Ю. Синтез многофункциональных управляющих устройств / Д.Ю. Муромцев, В.В. Папин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т.19. № 2. – С.262 – 270.

6. Муромцев Д.Ю. Концепция экспертной системы с непрерывно развивающейся базой знаний / Муромцев Д.Ю., Муромцев Ю.Л., Грибков А.Н. // Вестник Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института). №3(7). 2008. С.30-37.

7. Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н., Куркин И.А. База знаний интеллектуальной информационно-управляющей системы многомерным объектом // Информационно-управляющие системы. – 2015. – №5. – С. 60-64.

Патрикеев Л.Н.

ЧТО ДОЛЖЕН ЗНАТЬ БАКАЛАВР, МАГИСТР, СПЕЦИАЛИСТ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

National nuclear Phisycal University (MEPHY) Moscov
lnp70@mail.ru

В настоящее время более 50 университетов России прошли лицензирование и готовят бакалавров, магистров,специалистов и аспирантов по многим направлениям нанотехнологии. Мировое сообщество и мы находимся в начале 6 технологического уклада. Этот период (2010 -2040 годы) характерен тем, что в дополнение к ***информатизации***, революционизировавшей все отрасли промышленного производства вовремя 5 уклада (1970 – 2010 годы), стремительно нарастает всеохватывающее внедрение в производство ***нанотехнологий*** (Рис 1).

Рис.1 – Кондратьевские циклы экономической активности

Объёмы продаж изделий, появление которых напрямую связано с нанотехнологиями, уже сегодня составляет около 3000 млрд. долларов. К числу таких товаров грубо, но вполне можно отнести, 3 области производства: *наноэлектронику,* новые *материалы и медицину*. Начиная с 2018-2020 года в развитых странах не останется ни одной отрасли материального производства, ***эффективность*** которой не повышалась бы без внедрения нанотехнологических методов.

17 сентября 2015 года на общероссийском научном семинаре, который Нанотехнологическое Общество России (НОР) вместе с НИЯУ МИФИ ежемесячно проводит в Общественной Палате РФ, мне удалось выступить с дискуссионным докладом на тему «***Что должен знать каждый бакалавр, магистр и специалист по нанотехнологии***».Этот доклад вызвал активную полемику со стороны членов НОР, которые практически поддержали выдвинутые мной всего 11 важнейших тем , составляющих фундамент нанотехнологического образования. Очень надеюсь, что обсуждение этих вопросов окажется полезным не только магистрам, собравшимся здесь, но и преподавателям вашего вуза и приглашённым специалистам.

В настоящее время подготовка бакалавров, магистров и специалистов по нанотехнологии открытаболее чем в 50 вузах и университетах России. В учебные программы каждый вуз включает те курсы, которые *могут* преподавать сотрудники, не прошедшие, к сожалению, никакого повышения своей наноквалификации. Существовавший ранее контроль за учебным процессом со стороны специализированных УМО (ответственные вузы –МИСиС, СПбЭТУ и МИЭТ) в настоящее время заменён, казалось бы, контролем Минвуза при регулярных аттестациях. Одна-

ко, знакомство с дипломами бакалавров и специалистов из разных университетов, а так же с магистерскими «диссертациями» показывает очень широкий диапазон свободомыслия и разночтений фундаментальных основ нанотехнологии.

Какие же блоки фундаментальной подготовки по НТ представляются нам базовыми и именно теми, ***которые должен знать каждый*** выпускник по НТ? Вот эти блоки:

1. Мир, в котором мы живём и его социальные особенности.
2. Размерные эффекты.
3. Методы исследования наноструктур.
4. Базовые (или основные) технологии наноэлектроники.
5. Наноматериалы и нанотехнологии в живых системах.
6. Наноматериалы (графит, нанотрубки, алмаз, графен, фуллерены и т.д.).
7. Методы получения нанообъектов.
8. Нанотовары гражданского применения (медицина, сельское хозяйство, продукты питания, потребительские товары, строительство, энергетика…).
9. Программы работ США, Европы и других стран.
10. Военные приложения нанотехнологий.
11. Кадры для наноиндустрии на ближайшие5, 15, 30 и далее лет.

Хотелось бы надеяться, что зная хотя бы отмеченные базовые проблемы нанотехнологии, выпускники вполне смогут глубоко и ***самостоятельно*** доучить все необходимые для активной работы *учебные предметы* (***физику твёрдого тела, материаловедение, химию и её супрамолекулярные разделы, математическое моделирование и биологию***), *необходимое оборудование* и *производственные технологии*.

Ниже в очень сжатом изложении приводится характеристика некоторых из перечисленных выше блоков.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ МИР, В КОТОРОМ МЫ ЖИВЕМ

Начиная с 2000 года, когда в соответствии с кодратьевскими циклами экономической активности (Рис.1)[Л1] весь мир оказался в условиях всеобщей компьютеризации, персональных ЭВМ, появления интернета, спутникового телевидения и мобильной связи, все мы живём в новом – ***ИНФОРМАЦИОННОМ МИРЕ***. Степень влияния информационных технологий на нашу жизнь за последние 20 – 30 лет стала так велика, что стали меняться вековые уклады жизни целых народов и культур.

Сегодня на смену и дальнейшее развитие информационных технологий (ИТ) приходят нанотехнологии (НТ). Системное влияние НТ и ИТна общество, огромный инновационный потенциал, очевидная способность революционизировать все сферы жизни заставляют оценивать их не только с научно-технической, но и ***социально-экономической и философской*** точки зрения.

Последствия развития НТ будут ещё масштабнее, чем ИТ: долговечность, качество, компактность и дешевизна потребительских товаров; доступность медицинского обслуживания, нанодиагностика и лекарства; возникновение глобальной связи, «интеллектуализация» вещей; быстрое развитие индустрии потребует коренной перестройки образования.

По оценкам С.П. Капицы к 2050 году население Земли достигнет *предельной* численности около 11,2 млрд человек. При этом, уже наметившаяся тенденция концентрации населения в ***крупных*** городах (от 3 до 20 и более млн. чел.),становится одним из определяющих факторов.

В настоящее время мировое потребление *энергии* составляет примерно **14 ТВт**. К 2050 году оно возрастёт более, чем до 16 ТВт, а к 2100 до примерно 33 ТВ! Заметим при этом, что население США, составляющее не более 5 % населения Земли, сегодня потребляет более 20 % мирового производства энергии. Заменить истощающиеся ресурсы энергетики на основе использования нефти, газа и угля в ближайшие 30 – 50 и более летвполне смогут атомные энергетические установки. Однако предстоит решить не простую задачу захоронения радиоактивных отходов. Спрашивается, а на что надеяться в будущем?

Дадим для справки оценку потенциальных возможностей производства энергии за счёт ***возобновляемых*** источников:

Энергия Солнца может обеспечить не менее **10000** ТВт; Ветровые генераторы–до **14** ТВт; Биомасса - **5 -7** ТВт; Геотермальные станции – до 1,9 ТВт; Гидростанции до 1,2 ТВт; Приливные

(океанические) установки – до 0,7 ТВт. Добавим к этому списку экологически чистые хранилища энергии, к которым отнесём солнечные накопители, литиевые батареи, *топливные элементы и суперконденсаторы*. Не вдаваясь в технические подробности, отметим, что солнечные батареи, топливные элементы и суперконденсаторы на основе широкого внедрения нанотехнологий уже сегодня показывают перспективность их дальнейшего широкого применения.

И *воды и пищи* и теперь, и при предельном населении Земли, никогда не хватало и не будет хватать без активного внедрения нанотехнологий в очистку и опреснение воды и в биотехнологии. Достаточно напомнить, что в наше время более 15 % населения Земли испытывают перманентную недостаточность в воде.

Нанотехнологии уже сегодня приносят ощутимые результаты, сравнимые и постепенно превосходящие информационные технологии, но и одновременно рождают *экологические* риски и неопределённости. Нанопродукция должна специально тестироваться на предмет безопасности для человека и окружающей среды и иметь различимые этикетки об этом.

Проблемы *бедности* и *нищеты* значительной части населения Земли так же, как проблемы *терроризма и войн*, межгосударственных разногласий и *демократии* в настоящем выступлении можно не комментировать, поскольку они очень широко обсуждаются в нашей печати, на радио и телевидении. Нет сомнения в том, что они хоть в какой- то степени затрагивают умы и сердца наших студентов.

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

В наномире свойства любых материалов существенно зависят от их размера. Это одна из фундаментальных особенностей наноструктур, обусловленная целым рядом физико-химических особенностей, среди которых отметим следующие:

- В частицах, размеры которых менее 100 нм, *высока доля поверхностных* атомов. Свойства атомов, находящихся на поверхности, отличаются от свойств «внутренних» атомов.
- Они обладают большей энергией и поэтому температура плавления наночастиц с уменьшением их размеров становится меньше температуры плавления «массивного» образца

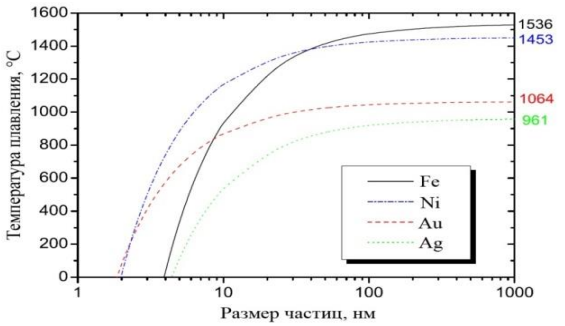


Рис.2 – Зависимость температуры плавления от размера частиц

- Атомы, находящиеся на поверхности наночастиц, обладают высокой реакционной способностью и вступают в такие химические реакции, которые невозможны для «объёмных» частиц (такие эффекты можно отнести к химическим размерным эффектам);
- Физические размерные эффекты проявляются в измененниикинетическиех коэффициентов *электропроводности, диффузии, теплопроводности*;
- Для большинства поликристаллических материалов с уменьшением размера кристаллитов возрастают твёрдость и предел упругости (это механические размерные эффекты);
- В полупроводниковых структурах с изменением размеров квантовых точек из-за *плазмонноро резонанса* происходит изменение цвета *люминисценции*квантовых точек [Л2];

- Поверхностные атомы оказывают сильное влияние на свойства внутренних слоёв . В частности, поверхностные атомы «вытягивают» из объёма наночастиц различные дефекты структуры, связанные с технологией их получения;
- Ансамбли наночастиц склонны к самоорганизации и самосборке.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР

В настоящее время арсенал метрологических средств, используемых для исследования наноструктур, достаточно широк [Л3]. Однако, необходимо выделить четыре важнейших группы, без комплексного использования которых анализ исследовательских и технологических результатов в области нанотехнологий становится бессмысленным:

- Сканирующие зондовые методы (СЗМ) на основе использования Туннельной микроскопии (STM), атомно-силовой микроскопии (AFM), магнито-, екостной-, тепло- и тд. микроскопии (MFM, SCM, SThM …),
- Электронно-лучевые методы – просвечивающая электронная микроскоаия, растровая электронная микроскопия, ОЖЕ-микроскопия;
- Квантовые методы – микроскопия ближнего поля, конфокальная микроскопия, рентгено-структурный анализ, фотолюминисцентный анализ и метод комбинационного рассеияния.
- Многозондовые высокочастотные тестеры для изучения электрических свойств наноструктур, без которых не может обойтись микро- и наноэлектроника
- Обратим внимание на то, что сканирующие микроскопы позволяют исследовать образцы в любых средах и не разрушать их..

БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В монографии [Л4] дано лаконичное и одновременно очень глубокое определение нанотехнологии, которую автор определяет как «***область естествознания, предметом изучения которой служат объекты с размерами от 0,1 до сотен нанометров***». Одной из самых продвинутых промышленных наотехнологий сегодня являются технологические методы создания наноэлектронных элементов. Многие методы наноэлектроники широко применяются при создании и усовершенствовании продуктов других отраслей промышленности. Поэтому знакомство с её базовыми методами наноэлектроникипозволяет широко использовать их как основу многих смежных и других областей практического применения нанотехнологий.

- Можно выделить следующую последовательность базовых технологических операций наноэлектронного производства [Л5]:
- ***Нанесение слоёв, Литография, Травление слоёв, Осаждение и травление***. Каждую из этих групп операций необходимо дополнить их конкретным содержанием.
- К ***нанесению слоёв*** отнесём следующие технологические процессы: лазерная абляция (V_2O_3, ZnO, ItBaCuO, $Pb(TiZ_2)O_3$, Al_2O_3, CeO, Y_2O_3, AlN, MgO); плазмо-химическое осаждение (SiO_2, Si_3N_4, poliSi); рост УНТ и графеновых слоёв; формирование слоёв фотостимулированным осаждением, в том числе жертвенных слоёв ($Ge_xSi_{1-x}O_2$) + (($Ge_ySi_{1-y})_3N_4$); магнетронное напыление металлов; нанесение резиста для литографий: ионной, электронной и оптической.
- ***Литография*** является одной из самых дорогих и одновременно ключевых операций переноса на полупроводниковые пластины топологических изображений интегральных схем. В некоторых процессах создания сверхбольших интегральных схем (СБИС) литографические операции достигают 20 и более кратных повторений со сменой соответствующих шаблонов.
- Существуют два подхода к осуществлению литографии – ***шаблонный***и***бесшаблонный***. Бесшаблонный метод, основан на электронно- лучевом экспонировании, в качестве достоинств которого применительно к *мелкосерийному* производству СБИС относятся:
- Отсутствие затрат на производство шаблонов (все они хранятся в памяти управляющего вычислителя разработчиков);
- Высокая скорость разработки СБИС и поддержка её секретности;

Травление слоёв (плазмохимическое) используется в технологии производствананоэлектронных схем для очистки, утонения, травления через резистивную маску и для удаления резиста;

Осаждение и травление фокусированным ионным или электронным пучком ***(***ФИП или ФЭП) позволяет проводить следующие технологические процессы: осаждение W , Mg , Pt , C , Ni ; травление фтором; формирование рисунка в маскируемом слое; создание островков катализаторов для роста УНТ (Ni , Fe , Co); изготовление объёмных наноразмерных структур.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ

Вся биосфера построена из наночастиц и наноструктур. Это хорошо отточенный, в ходедлительной эволюции процесс, приводящий к образованию живых организмов – от простейших ***одноклеточных*** до ***человека*** [Л4,Л6, Л7].

Для сборки сложных биологических структур Природа отбирает из окружающей среды только те элементы, которые реально необходимы. Поэтому природный биосинтез можно признать почти безотходным, экологически чистым и проходящим без использования высоких температур и давлений.

Основные направления развития нанобиотехнологий, согласованные экспертами Евросоюза применительно к использованию в практической ***медицине***, можно обобщённо свести к следующим 4 направлениям:

1. создание нанострктурированных лекарственных препаратов и методов их адресной доставки;
2. разработка методов исследования и визуализации биомолекулярных структур;
3. поиски методов диагностики и мониторинга с помощью биосенсоров, биопроцессоров и гибридных биоэлектромеханических систем (биочипов);
4. создание новых методов и средств для предупреждения опасных болезней, терапии, протезирования, трасплантологии предупреждения опасных болезней, терапии, протезирования, трасплантологии и выхаживания прооперированных больных.

(Кроме указанных основных направлений мдицинских биотехнологий, ниже мы остановимся на тесно связанных с ними проблемах пищевых технологий, геномики и протеомики).

Многие страны имеют национальные программы исследований и разработок для наномедицины. Рост объёмов инвестиций в эти разработки за последние годы является рекордным и составляет примерно 100% в год! Каких направлений исследований и разработок касаются национальные программы по наномедицине?

Биофармацевтика – это и разработка новых, в том числе индивидуальных для пациентов, лекарств (что возможно с использованием только мощных супер-ЭВМ), их капсулирование и адресная доставка к поражённым органам; разработка биологически совместимых, в частности, костных и тканевых ***имплантов***; имплантируемые ***сенсоры***, приборы и целые ***протезирующие*** устройства; ***хирургические*** «активные» инструменты и хирургические роботы; ***диагностические*** средства для генетического тестирования, визуализации, мультисенсорноого анализа и создания вживляемыхнанометок.

Весьма желательно, чтобы наши ученики хотя бы бегло, но более глубоко, чем на школьных уроках по биологии и химии, познакомились с такими биологическими объектами, как *белки, нуклеиновые кислоты, клеточные мембраны, вирусы, полимеры, жидкие кристаллы, поверхностно - активные вещества, сорбенты и катализаторы*.

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Наноматериалами можно назвать любые объекты, вещества или их композиции, размеры которых лежат в пределах от 0,1 и до сотен нм. В настоящее время наибольшее практическое применение нашли различные ***углеродные*** материалы. В органической химии углерод рассматривается как *биоорганический* элемент, его соединения играют особую роль в построении и жизнедеятельности растительных и животных организмов, в составе которых углерод составляет до 18% их массы.

На Рис.3 приведены все аллотропные формы углерода, широко используемые в традиционной и современной (уже многотоннажной) нанопромышленности: ***графен, графит, одностенные и многостенные углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерен C_{60} и алмаз***.

Графен является самым простым по строению среди других модификаций углерода и может рассматриваться в качестве их структурного блока. Графенсложен из шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода. Каждый атом связан с тремя соседними напоминающими ячейки пчелиных сот. Межатомные расстояния в графене очень коротки (0,142 нм) и прочны.

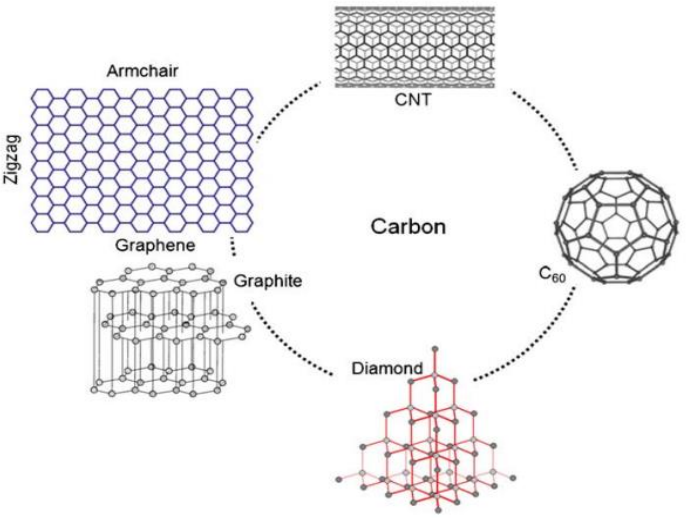


Рис.3 – Аллотропные формы углерода

Если слои графена расположить с некоторым смещением друг над другом, то получится обыкновенный ***графит***, широко используемый, в частности, для изготовления каранда Если лист графена свернуть в цилиндр – получится однослойная ***УНТ*** с радиусом от 0,2 до 50 нм и длиной от 1 до 100мкм.

Наконец, лист графена определённой формы можно свернуть так, что получится похожий на футбольный мяч фуллерен C_{60} . Для идеального подобия шару, кроме 20 шестиугольников молекула фуллерена C_{60} содержит 12 пятиугольников, где каждый атом углерода связан с тремя соседними одной короткой *двойной* связью (0,1391нм) и двумя *одинарными* длинными связями (0,1455 нм). При таком строении «мячик» фуллерена C_{60} имеет диаметр 0,7 нм.

Поисковые работы по практическому применению графена прежде всего связаны с его удивительными электро-физическими свойствами. В Табл. 1 приведены сравнительные характеристики графена, кремния, арсенида галлия и меди [Л8].

Таблица 1

Характеристика материала	Графен	Si	GaAs	Cu
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м.К)	3100	12	55	390
Подвижность электронов, $м^2/(В.с)$	5	0,15	0,85	$3.5 .10^{-3}$
Удельное электросопротивление, Ом . м	2.10^{-8}	$>10^{-4}$	$\sim 2.10^{-7}$	$1 6.10^{-8}$

Анализ приведенных в Табл. 1 данных позволяет сделать выводы о целесообразности и возможных применениях графена в электронике и наноэлектронике:

1.Прежде всего это - суперэффективный теплоотвод;

2.Прекрасный проводник для изготовления межэлементных соединений в СБИС ;

3.Материал, который может быть использован вместо кремния и арсенида галлия для изготовления высокочастотных транзисторов и эксафлопных элементов ПК.

Подвижность носителей в графене при *гелиевой* температуре составляет 20 $м^2$/В.с! При *комнатной* температуре в «подвешенной» плёнке графена она снижается до 15 $м^2$/В.с. В случае размещения на поверхности SiO_2 подвижность в гафене снижается до 5 $м^2$/В.с, что в 30 раз больше, чем у кремния и почти в 6 раз больше, чем у арсенида галлия! Лабораторные образцы предполагаемых применений уже опробованы и опубликованы. Дело за разработкой дешёвых технологических методов получения и собственно графена и промышленных технологий его использования.

Промышленное, многотоннажное производство **однослойных углеродных нанотрубок** (**ОНТ**) и многослойных **УНТ** в настоящее время освоено многими фирмами в США, Европы и Азии.

ОНТ и многостенные УНТ могут быть заполнены различными атомами. Очевидно, что способность вещества заходить в узкий канал и капсулировать трубки зависит от смачиваемости или величины поверхностной энергии наполнителя. Полости УНТ исследователи научились заполнять и металлами и биологическими молекулами, то есть использовать их, например, как контейнеры для доставки лекарств, хранения водорода, в качестве селективных биосенсоров и т.д.

Области других промышленных применений нанотрубок весьма широки:

- незначительные по массе добавки УНТ (10^{-4}-10^{-6}) резко увеличивают, например, прочностные характеристики автомобильных покрышек, полимеров, лакокрасочных покрытий, стекла и бетона;

- тонкие слои из УНТ, нанесенные или выращенные на поверхности режущих инструментов и трущихся деталей, резко повышают твёрдость и износостойкость оборудования;

- волокна из нанотрубок отличающиеся по прочности от нитей и тросов из стали в десятки раз и одновременно в десятки раз более лёгкие, конструкторы надеются использовать для постройки космического лифта…

Фуллерены, так же, как и УНТ, могут быть капсулированы атомами металлов, образовывать при полимеризации ансамбли, что приводит к заметному изменению физических свойств, например переходу в сверхпроводящее состояние или проявлению магнетизма.В литературе обсуждаются широкие перспективы применения фуллеренов в наноэлектронике,медицине и технике.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В настоящее время используется множество лабораторных и промышленных технологий получения углеродных наноматериалов [Л9,Л10].

Получение маломасштабных образцов ***графена*** осуществляются пока только ***лабораторными***методами. Небольшую реплику этого материала можно получить путём разрезания ОНТ в плазме аргона (Рис.4). А. Гейм, К. Новосёлов и С. Морозов получали образцы графена методом отслаивания необходимого слоя непосредственно от графита. Экспериментальные плёнки графена можно получить в процессах эпитаксиального роста SiC на подложках из Si, медной фольги и на кристаллической поверхности Cu.

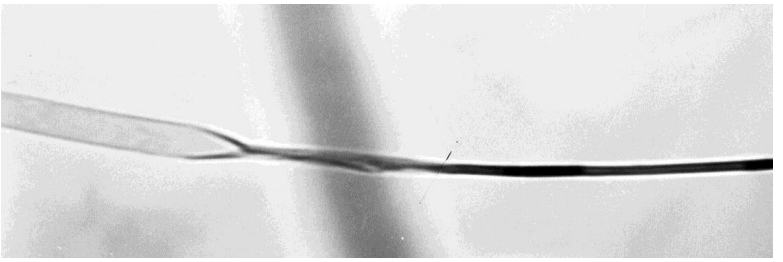


Рис.4 - Графен из раскрытой УНТ

К числу ***промышленных*** методов получения углеродных ***наночастиц*** относятся:

- Плазменный электродуговой метод распыления графита (разрядно-дуговой метод) ;
- Метод лазерной абляции ;
- Метод химического осаждения из пара
- Выращивание упорядоченных рядов УНТ и получение длинных нитей.

Разрядно-дуговой метод по сей день остаётся самым популярным. В этом способе для получения углеродныхнанотрубок используется термическое распыление грвфитового электрода в плазме дугового разряда, горящего в инертной (аргон, гелий) атмосфере. В процессе синтеза до 90% сажи осаждается на поверхности графитового катода в виде цилиндрических пучков УНТ диаметром до 50 мкм.

Метод лазерной абляции получения УНТ заключается в обстреле помещённой в вакуумную камеру графитовой мишени импульсным лазером. Добавляя в мишень разные катализаторы (NiCo) получают до 50% однослойных нанотрубок диаметром 1,3 – 1,4 нм, а применяя одновременно лазеры с различной длиной волны УНТ разных видов.

Метод химического осаждения из пара состоит в простом пропускании газообразных углеводородов (метан, этилен, ацетилен) в разогретую до 600 - 800^{0}С кварцевую камеру, в которой располагают либо кобальт-, либо никельсодержащий катализатор. Этим методом можно получать не только простые нанотрубки, но и весьма ценные слоистые структуры, содержащие упорядоченные столбы из УНТ и слои покрывающих их графенов (Рис.5)

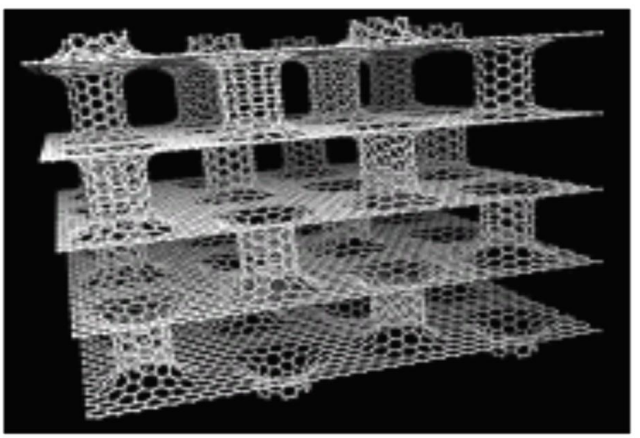


Рис 5. Многоэтажная конструкция

Управляемый рост рядов УНТ удаётся получить на кремниевой подложке, покрытой слоем SiO_2

НАНОТОВАРЫ ГРАЖДАНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Традиционная ***медицина*** включает в себя диагностику, лекарственную терапию, далее хирургическую, химио- или рентгенотерапию и выхаживание «вылеченного» пациента. В настоящее время происходит объединение традиционной медицины и нанотехнологий. Развитие *бионанотехнологий* позволяет конструировать совершенно новые подходы к лечению пациентов.

Диагностику с использованием*биочипов* в таком контексте вполне можно назвать началом новой ***наномедицины***. Пока ещё не созданы лекарства и методы их *адреснойдоставки* к поражённым клеткам. Но эти идеи широко исследуются. Белковые нанокапсулы, мицеллы, дендримеры, полимерные и оксидные наночастицы зачастую используются в качестве транспортных средств доставки лекарств.

Применение наноматериалов***в сельском хозяйстве*** можно рассматривать в очень широком плане – от использования генной модификации растений, рыб, птиц и животных до обработки и культивации почв, семяподготовки и создания высоконадёжной сельскохозяйственной техники.

Предпосадочная обработка семян сельскохозяйственных растений широко исследуется многими специалистами. Например, даже краткосрочная выдержка семян пшеницы, капусты, картофеля, моркови и других растений в растворе, содержащем наночастицы железа (полученные методом лазерной абляции) обеспечивает на практике повышение урожайности этих растений минимум на 20%. Одновременно такая обработка повышает морозо- и засухоустойчивость.

Добавление в пищу рыб, кур, свиней и крупного рогатого скота некоторых минимальных по объёму нанодобавок приводит к аналогичным практическим результатам - снижению потерь молодняка, ускорению роста и т.д.

Проблемы ***продуктов питания*** теснейшим образом связаны с применением нанотехнологий в сельском хозяйстве. Поэтому каждыйобразованный человек обязательно свяжет эти возможности и риски с применением генно-модифицированных культур (ГМК). Бояться здесь нечего – за все годы коммерческого использования ГМ- растений и животных нет доказательств их токсичности или неблагоприятных последствий для производства пищи и кормов.

Дело в том, что ГМ используется главным образом для того, чтобы уменьшить ущерб от воздействий на растения различных болезней, холода, жары или вредителей- насекомых.

Говоря о ***потребительских товарах***, ранее мы уже неоднократно упоминали о повышении показателей качества и цены применительно к автомобильным покрышкам, режущему инструменту и лакокрасочным покрытиям

Несколько добрых замечаний следует сделать по поводу использования нанотехнологий в ***строительной индустрии***. В России и за рубежом широко применяются цементные смеси с добавками нанотрубок и других углеводородов. Такие бетоны, например, обеспечивают целый ряд положительных качеств строительных конструкций – повышение прочности, термо- и влагостойкости, повышение или наоборот снижение удельного веса и т.д. [Л11].

ПРОГРАММЫ РАБОТ США, ЕВРОПЫ И ДРУГИХ СТРАН

В 2000 году в ответ на всё более развивающиеся японские разработки [Л3], Конгресс и президент США приняли «Государственную нанотехнологическую инициативу» с объёмом финансирования 500 млн.долл. Рассчитанной на 20 лет программой этих работ, в частности, предусматривалось:

- Создание запоминающих устройств с мультитерабитным объёмом памяти;
- Разработка сверхпроных материалов и транспортных средств на их основе;
- Повышение быстродействия компьютеров в миллион раз;
- Разработка медицинских препаратов для борьбы с раком;
- Поиски новых методов очистки воды и воздуха и защиты окружающей среды;
- Повышение КПД солнечных батарей более чем в 2 раза…

В [Л12] были опубликованы открытые адреса фирм, университетов и профессуры, привлечённых к первым НИР и ОКР США. К настоящему времени объём государственных и частных инвестиций в нанотехнологию уже давно перевалил за миллиарды долларов…

Не отстают и многие азиатские страны и прежде всего Китай, Япония и Южная Корея. Одной из особенностей азиатского развития производства высокоинтегрированной электроники и других массовых производств является более низкая, чем в Европе и Америке стоимость занятой на производстве рабочей силы.

ВОЕННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Во все времена существовали технологии, материалы и изделия *двойного* – гражданского и военного *назначения*. Формированием научно-технических программ США, их финансированием и контролем за выполнением занимается управление Министерства обороны DARPA. Это управление выделяет огромные средства не только на прикладные и опытно-конструкторские разработки, но и на фундаментальные программы. При этом стоит отметить, что в первую очередь область военных применений нанотехнологий в США опирается на разработку сверхбыстродействующих супер- компьютеров, наносенсоров и миниатюрной робототехники.

Быстродействующие и сверхминиатюрные микропроцессорные устройства и сенсоры широко внедряются во все традиционные и новые виды вооружений, одежду и обмундирование солдат и, естественно, в миниробототехнические устройства. Это позволяет всемерно расширить искусственный «интеллект» всех систем управления боевыми действиями и обеспечить жизнедеятельность солдат даже при их ранении.

Другой сферой военных наноразработок является создание абсолютно необычных средств нападения и защиты. Это заставляет станы, расположенные по соседству с теми, где предполо-

жительно ведутся такие разработки, активно вести разведку и финансировать разработки прдупреждающих возможное применение таких средств нападения.

В целом можно отметить, что в будущих военных конфликтах всё более важную роль будут играть упреждающие и превентивные действия [Л7, Л13].

КАДРЫ НАНОИНДУСТРИИ В БЛИЖАЙШИЕ 5, 15, 30 И ДАЛЕЕ ЛЕТ

По оценкам специалистов США в ближайшие годы потребности их страны в специалистах будут составлять не менее 30000 нанотехнологов в год. Все российские вузы, ведущие подготовку по этому направлению, обеспечивают подготовку едва ли 1000 выпускников в год. Естественно, что это объясняется, с одной стороны, очень скромной пропагандой нанотехнологий в школьных учебниках, в газетах и на телевидении, а, с другой стороны, слабой заинтересованностью со стороны медленно рождающейся отечественной наноиндустрии.

Междисциплинарность основана на идеях интеграции таких наук как ***техническая физика, биология*** и ***химия***. В системе школьного и вузовского образования сегодня не найти специалистов, которые смогли бы органично объединить в своей научно-практической и педагогической деятельности все три главных дисциплины названной выше междисциплинарной триады. Решить проблему можно путём *гуманизации* традиционного у нас технического образования и *технизаци* гуманитарного образования (о чём мы кратко упомянули, касаясь сугубо гуманитарного медицинского образования).

Классическим примером технической междисциплинарной науки является материаловедение [Л9]. Если бы авторы привлекли к созданию своего учебника хотя бы одного биохимика, мог бы получиться не хороший, а***блестящий***учебник. Преставляетсянеобходимым и возможным поступать именно так: привлекать к разработке программ высококлассных специалистов, способных к коллективному творчеству.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные базовые характеристики нанотехнологий могут оказать помощь не только начинающим бакалаврам, магистрам и специалистам, но и молодым преподавателям и даже абитуриентам, которые готовятся выбрать направление своей учебы и деятельности.

Библиографический список

1. Нанотехнологии как фактор нового технологического уклада в экономике /Под ред.академика РАН С.Ю Глазьева и проф. В.В.Хари-тонова.-М.: «Травант» - 2009.
2. *Евдокимов Ю.М., Салянов, В.И., Скуридин С.Г.* Наноконструкции на основе ДНК. /под ред Ю.М. Евдокимова.-М.: СПАЙС-ПРЕСС.-2010.
3. *Кабояси Н.* Введение в нанотехнологию/ перевод с англ. А.В. Хачаяна. Под ред. Проф. Л.Н. Патрикеева - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.-2005.
4. *Эрлих Генрих.* Малые объекты – большие идеи. Широкий взгляд на нанотехнологии./Под ред.проф. Л.Н. Патрикеева. БИНОМ. Лаборатория знаний.-2012.
5. *Быков В.А.* Кластерное оборудование для создания и исследования элементовнаноэлектроники//Известия Южного федерального универ-

   ситета. Технические науки. Выпуск №4 (том 117).-2011.
6. Нанотехнологии. Азбука для всех/ под ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008.
7. *ГоловинЮ.И.*.Наномир без формул./Под ред. проф. Л.Н. Патрикеева.-М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.- 2011.
8. *Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В.В.* Основы материаловедения: учебник для вузов/ Под ред .Г.Г. Бондаренко -М.: БИНОМ.Лаборатория знаний.-2014
9. *Дьячков П.Н.*Углеродныенанотрубки. Строение,свойства,применения. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.-2006
10. *Раков. Э.Г.*Неорганическиенаноматериалы.-М.: БИНОМ.Лаборатория знаний.-2013
11. *ПатрикеевЛ.Н.*.Нанобетоны//Наноиндустрия. №12-2008.

12. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. / Под ред.М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса. Перевод с англ. А.В. Хочаяна. Под ред. Р.А.Андриевского.-М.:Мир-2002.

13. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений._М.: Техносфера.-2006.

Сахаров Ю.С., Колуков В.В.

АДАПТИВНЫЕ ИНТЕЛЛЕКУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Государственный университет «Дубна» 141982 г. Дубна Московской области,
ул. Университетская, 19
sakharovu@yandex.ru, vvkolukov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности создания интеллектуальных САПР (ИСАПР) электронных средств (ЭС) на основе систематического учета знаний опытных разработчиков и формализованного представления знаний предметной области. Предлагается подход и его реализация в виде прототипов специализированных экспертных систем (СЭС) для решения некоторых задач конструкторского проектирования ЭС в ИСАПР.

Ключевые слова: интеллектуальные САПР; знания о проектировании; моделирование предметной области проектирования электронных средств; экспертные системы.

MODERN APPROACHES FOR ADAPTIVE INTELLIGENT DESIGN ELECTRONIC MEANS

Abstract. Learn how to create intelligent CAD (ISAPR) electronic means (EM) on the basis of the systematic integration of knowledge of experienced developers and formalized knowledge representation of the domain. The approach and its implementation in the form of prototypes of specialized expert systems (SES) to solve some problems of design EM in ISAPR.

Key words: Intelligent CAD; knowledge of design; domain modeling design of electronic means; expert systems.

Введение

Одна из важных проблем автоматизированного проектирования и САПР электронных средств (ЭС) состоит в необходимости участия опытных разработчиков на различных этапах проектирования, что приводит к снижению эффективности САПР.

Возможным выходом из создавшегося положения является использование современных информационных технологий и, основанных на них, новых концепций проектирования.

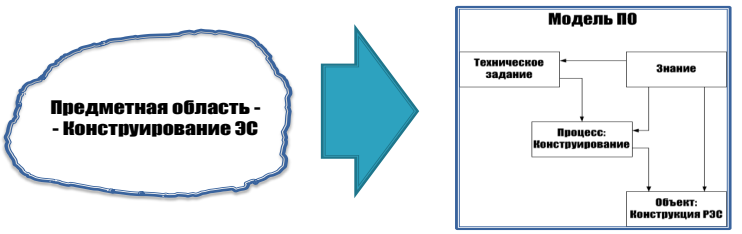
В работе исследованы вопросы поиска, систематизации, моделирования знаний и по результатам - построены прототипы интеллектуальных САПР (ИСАПР) для конструирования ЭС.

Представляемая далее система взглядов реализует гипотезу о необходимости и возможности объединения в единую систематизированную и формализованную концептуальную модель имеющихся знаний, в том числе плохо формализуемых, на примере проектирования электронных средств.

Особенность предлагаемой концепции в том, что: во-первых, она принципиально ориентирована на использование в новых информационных технологиях проектирования, т.к. предполагает реализацию в виде интеллектуальной САПР; во-вторых, в явном виде систематизировано учитывается субъект деятельности проектирования – человек; в-третьих, используются наиболее общие – информационные – модели для описания частей предметной области (ПО), что обеспечивает её универсальность. Для практической реализации предложенной концепции разработаны методики поиска, систематизации, моделирования знаний предметной области и построение прототипов специализированных экспертных систем (СЭС) для решения некоторых задач конструкторского проектирования ЭС в ИСАПР.

Что учитывать в модели предметной области? - Идентификация ПО.

В настоящее время нет общепринятого ответа на вопрос заголовка. Предлагается использовать, на наш взгляд, наиболее простой и очевидный вариант классификации знаний предметной области проектирования ЭС (рис.1).



Все знания о проектировании предлагается представить в виде четырех классов:

-ТЗ (техническое задание) – строго определённый набор требований.

-Процесс конструирования – действия, проводимые в ходе проектных работ.

-Объект – конструкция ЭС, результат проектирования.

-Знания – совокупность разнообразных знаний о предметной области.

Таким образом, необходимо получить модели для указанных классов знаний предметной области, при этом модели должны позволять следующее:

Модель ТЗ – возможность использования ее для большинства вариантов формулировок реальных ТЗ.

Модель объекта – должна реализовывать две функции:

- описывать собственно класс объектов разработки (конструкция ЭС) со своей геометрией, материалами и т.д.;

- описывать будущее решение как экземпляр класса.

Модель процесса – описывает стратегию и конкретный её вариант реализации в виде набора определённых действий при определённом техническом задании.

Модель знаний – сохраняет необходимые для получения решения знания:

- формальные знания обязательные к использованию; вероятность p их истинности единица, $p = 1$.

- субъективные, статистические, эмпирические знания; вероятность p их истинности меньше или равна единице, $p \leq 1$.

Сбор и систематизация знаний предметной области

На втором этапе работы необходимо провести извлечение полного набора знаний о предметной области, структурирование их в виде иерархических сущностей со всеми отношениями с последующей визуализацией модели.

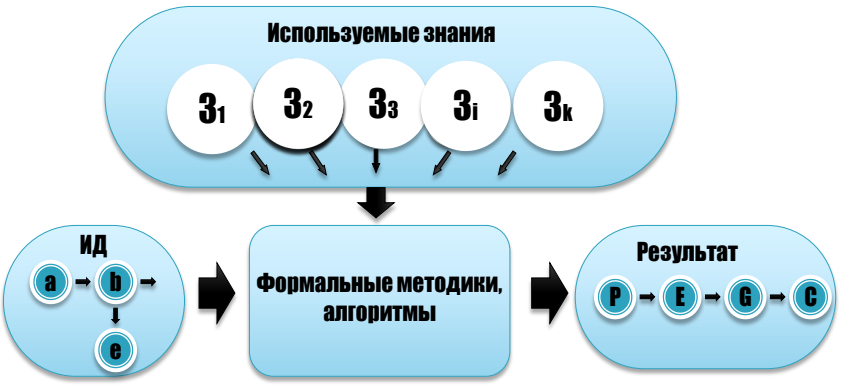
Результатом является поле знаний (концептуальная модель предметной области), - целостное и системное описание предметной области.

Возможны различные варианты построения модели. Основным недостатком большинства из них является слабый учет предварительных, заранее известных знаний о конкретной предметной области. Предлагаемая методика свободна от указанного недостатка и основана на учете, как строгих формальных наборах знаний, так и различного рода субъективных знаний разработчиков. Далее проводится систематизация найденных элементов знаний по следующим группам (метапонятия):

- данные **ТЗ**,
- информация о **результате**,
- дополнительно использованные **знания**,
- знания о **процессе** поиска решения.

В заключении выполняется группирование элементов знаний внутри метапонятий – построение **иерархии знаний** и поля знаний предметной области в виде таблиц, диаграмм, графов,

рисунков и т.д. Возможно использование технологий визуализации ERD, SADT, DFD, UML и т.д. Например, для моделирования ПО по задаче предварительной компоновки конструкции ЭС использована DFD-технология.



ИД (исходные данные) – где *a, b, e* и т.д – элементы ИД необходимые для работы формальных методик.

Используемые знания – где $З_1$, $З_2$, $З_3$,…$Зi$,…$Зк$ – элементы знаний, отсутствующие в ИД, но необходимые для работы формальных методик.

Результат – где *P,E,G,C* – элементы модельного описания объекта – результата.

Пример контекстной DFD 1-го уровня –
Предварительная компоновка РЭС

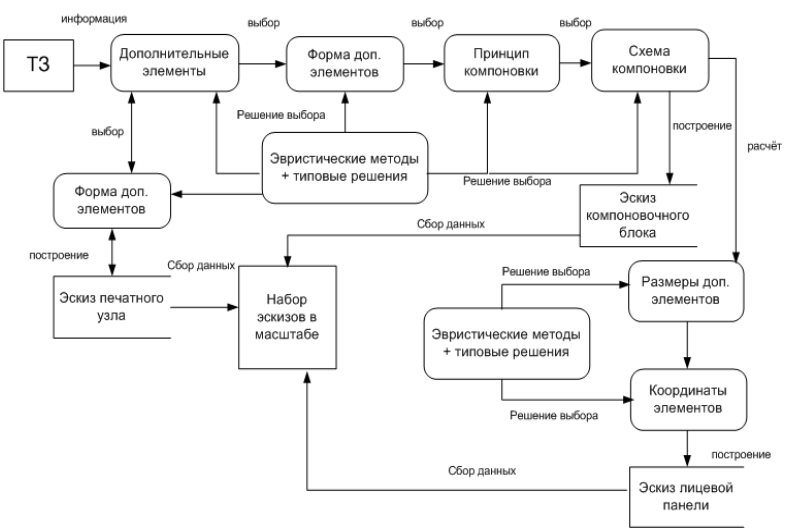
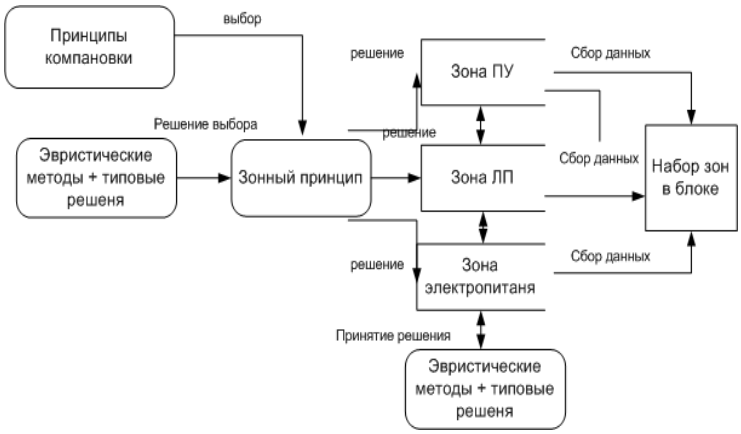


Диаграмма второго уровня - *Детализация принципов компоновки*



Далее представлены разработанные модели основных сущностей ПО.

Объект проектирования – электронное средство.

Объект проектирования представляется на основе положений теории систем.

Для описания технической системы (ТС), т.е. системы решающей технические задачи, есть смысл ввести в явном виде указание на основную особенность (или свойство) организации (или действия) ТС. Это свойство (особенность) обычно называется принципом действия. В общем случае их может быть несколько, $P = \{p_1, p_2, \dots p_K\}$. Тогда модель ТС будет выглядеть следующим образом

$$\mathbf{S = \{P, E, g, C\},} \qquad (1)$$

где **P** – множество принципов,

E – элементы (части) ТС,

g – структура (схема),

C – множество параметров ТС.

Очевидно, ЭС является частным случаем ТС и оно может представляться указанным выше способом. Рассматривая особенности ЭС, предложено [1] множество отношений R между элементами E разделить по их природе на электромагнитные $R_{ЭМ}$, механические R_M, тепловые R_T и геометрические (пространственные, компоновочные) R_K, т.е. $R = \{R_{ЭМ}, R_M, R_T, R_K\}$, со своими структурами $g_{ЭМ}, g_M, g_T, g_K$ и конституэнтами $C_{ЭМ}, C_M, C_T, C_K$. Тогда ЭС может быть представлено в виде

$$\mathbf{S = \{P, E, G, C\},} \qquad (2)$$

где **S** – электронное средство,

P – принципы организации ЭС, $P = \{p_1, p_2, \dots p_K\}$;

E – элементы ЭС, $E = \{e_1, e_2, \dots e_m\}$;

G – множество структур, $G = \{g_{ЭМ}, g_M, g_T, g_K\}$;

C – множество параметров, $C = \{C_{ЭМ}, C_M, C_T, C_K\}$.

Качественное различие отношений R определяет в системе S существование ряда природноразличных подсистем: электромагнитной $S_{ЭМ}$, механической S_M, тепловой S_T, пространственной (геометрической, компоновочной) S_K. В общем случае указанные подсистемы взаимодействуют между собой и ЭС можно представить как (рис.3)

$$\mathbf{S = \{S_S, R_S\}}, \qquad (3)$$

где $\mathbf{S_S}$ – множество подсистем, $S_S = \{S_{ЭМ}, S_T, S_M, S_K\}$;

$\mathbf{R_S}$ – семейство отношений между подсистемами.

При графической интерпретации указанных моделей, удается свести необходимые знания о всём разнообразии ЭС к простому модельному представлению в виде графа

(рис.4), который эффективно может быть размещен в базе. Разнообразие вариантов ЭС определяется множеством принципов P, элементов E, структур G и параметров C реализаций.

Таким образом, разработанная модель позволяет:

- описывать любые объекты проектирования с учетом их иерархического характера и различных видов связей между элементами;
- эффективно формировать, хранить и редактировать описание ансамбля вариантов в электронных базах;
- организовать формализованную процедуру синтеза (в том числе, и структуры) объекта.

Все последующее изложение применимо для объектов, которые могут быть представлены в виде указанной модели, т.е. разработанный подход адаптирован под теоретико-множественную модель.

Процесс проектирования

Другой важной частью знаний ПО является совокупность знаний о процессе проектирования. Существует несколько различных представлений процесса. Наиболее распространенной является содержательная модель, реализующая принцип декомпозиции, когда единый процесс проектирования π представляется в виде совокупности $\{A_i\}$ частных задач A_1, A_2, … A_i, … $A_м$, объединенных известным маршрутом M, (рис. 5),

$$\boldsymbol{\pi = < \{Ai\}, M >}. \qquad (6)$$

Однако указанная трактовка процесса $\boldsymbol{\pi}$ проектирования из-за ряда недостатков (например, отсутствие универсальности) не может быть непосредственно использована при построении ИСАПР. Необходимо реализовать наиболее общее представление о процессе $\boldsymbol{\pi}$, которое, на наш взгляд, должно описывать внутреннюю сущность проектирования как вида деятельности.

Исходя из указанного, в качестве модели процесса проектирования $\boldsymbol{\pi}$ при построении ИИСП использована наиболее общая модель, трактующая процесс как многократно повторяющиеся различные виды деятельности: синтез, анализ, принятие решения (рис. 6), названная семантической моделью [2].

С учетом введенной ранее системной модели ЭС, далее сформулировано множество типовых процедур, составляющих процесс проектирования:

- синтез компоновочной подсистемы S_K, в свою очередь распадающийся на процедуры синтеза принципов P_K, состава элементов E_K, синтез компоновочной схемы g_K, синтез параметров C_K компоновки;
- синтез механической подсистемы S_M и т.д.

Однако введенные модели ЭС и процесса $\boldsymbol{\pi}$ не дают возможности определить последовательность, маршрут M выполнения установленного набора типовых процедур.

Из-за сложности одновременного проектирования подсистем $S_{ЭМ}$, S_T, S_M, S_K реально возможно последовательное или последовательно-параллельное проектирование. Далее сделан вывод о том, что последовательность M выполнения процедур должна определяться условием минимальной неопределенности в информации (исходных данных) для реализации очередной типовой процедуры проектирования. Исходя из принятого условия выявляется типовая практическая стратегия проектирования ЭС (рис.7), которая, в каждом конкретном случае, корректируется в зависимости от совокупности имеющихся исходных данных $З_{ИД}$ о проектной ситуации с получением собственного рабочего перечня решаемых задач $A = \{A_i\}$ и своего маршрута проектирования M

$$\boldsymbol{\pi = \{З_{ИД}, \{A_i\}, M\}}. \qquad (7)$$

Таким образом, семантическая модель отличается универсальностью и возможностью выявить сущность проектирования. Использование модели в сочетании с введенным системным представлением об объекте проектирования позволяет систематизировать знания о процессе проектирования с выработкой маршрутов проектирования любых объектов и, кроме того, получить метазнания для построения ИСАПР.

Субъект деятельности проектирования – человек, коллектив разработчиков.

Оценивая множество моделируемых знаний субъекта, необходимо разделить их на два типа:

- знания опытных разработчиков и коллективов («проверенные» на практике),
- знания конкретного, единичного проектировщика при использовании ИСАПР.

Систематизированный учет первой группы знаний может быть реализован с помощью методов искусственного интеллекта, например, в виде экспертной системы проектирования. К сожалению, в настоящий момент неизвестны коммерческие экспертные системы проектирования, аккумулирующие в полной мере всю совокупность эвристических знаний опытных разработчиков.

При разработке прототипа электронной версии ИСАПР была предложена и реализована модель знаний субъекта в виде совокупности Ф фактов и правил П продукции типа

“ЕСЛИ факт <ϕ_i>, то факт <ϕ_j>”, (8)

как наиболее полно отвечающая условиям задачи моделирования знаний проектировщиков при построении базы знаний экспертной системы.

Особенность реализации общего подхода в данном случае состояла в необходимости учета группирования многих фактов и иерархической структуры порций знаний. Поэтому в качестве фактов выступают иерархические квазифреймовые образования (рис.8).

Другой особенностью моделируемых знаний субъекта является необходимость учета степени их неопределенности. В реализуемой версии ИСАПР это достигается введением вероятности W существования фактов Ф и правил П.

Таким образом, учет субъекта проектирования реализован, во-первых, в виде сформулированных экспертом множества фактов–условий $У_Э$, фактов-ограничений $О_Э$, правил $П_Э$ использования соответствующих порций информации (знаний) базы знаний, во-вторых, в виде учета знаний проектировщика-пользователя $З_П$ при выборе оптимального маршрута М проектирования. Последнее выполняется за счет двухэтапной процедуры поиска решений; причем на одном из них – сценарии – реализуется систематизированный ввод необходимой и достаточной для работы экспертной системы порции знаний $З_П$ субъекта-пользователя.

В итоге, введенное модельное представление о субъекте позволяет систематизировано учитывать при проектировании, как совокупность эвристических знаний опытных разработчиков, так и конкретных пользователей. Кроме того, указанные знания могут храниться, пополняться, редактироваться и тиражироваться. Особо нужно отметить то, что эвристические знания опытных разработчиков могут быть использованы при обучении.

Дальнейшие исследования позволили разработать базы знаний для решения некоторых типовых задач конструкторского проектирования ЭС. Базы содержат блоки знаний «ТЗ», «Результат», «Знания эксперта». Знания о «Результате» содержат информацию о «Принципах», «Элементах», «Схемах» и «Параметрах» конструктивного решения.

Практическая реализация концепции в настоящее время представлена разработанными прототипами специализированных экспертных систем (СЭС), которые используются как при решении конструкторских задач, так и в виде сетевых учебно-методических комплексов для обучения проектированию конструкций ЭС.

Построено несколько прототипов СЭС, с помощью которых решаются задачи поиска предварительного варианта конструкции, обеспечения защищенности ЭС от механических и тепловых воздействий и для обучения проектированию.

Практика использования выявила ряд новых задач, требующих исследования и решения. Одной из них является необходимость учета особенностей личности и психологические особенности стиля деятельности пользователя СЭС, которая проявляется либо в настаивании на неверном принятым им решении, либо в отказе принимать самостоятельное решение в ходе работы. Последствиями личностных качеств пользователя становится увеличение времени работы или даже получение ошибочных результатов на прототипах СЭС. Работа по адаптации СЭС под конкретного пользователя стала весьма актуальной и в настоящее время на кафедре проводятся соответствующие исследования по разработке адаптивного метода

многокритериального учета стиля деятельности конкретного разработчика для повышения эффективности его работы с СЭС.

Заключение

Предложен новый подход к моделированию знаний предметной области проектирования ЭС для построения ИСАПР, основанный на концепции систематического учета знаний опытных разработчиков и формализованного представления знаний предметной области. Предлагаются подход и его реализация в виде прототипов специализированных экспертных систем (СЭС) для решения некоторых задач конструкторского проектирования ЭС в ИСАПР.

Подход позволяет объединить и систематизировать известные и выявлять новые знания, как по отдельным составным частям предметной области, так и в целом методологии проектирования, повышать эффективность процесса проектирования и обучения проектированию, а в конечном итоге, повысить качество ЭС и снизить затраты на проектирование.

Список литературы

1. Колуков В. В. Об оптимальном техническом проектировании МЭА на основе базовых конструкций. //Труды МЭИ, вып 498. – М.: МЭИ, 1980 г.
2. Колуков В. В. Конструкторское проектирование РЭС в интеллектуальной САПР. // Журнал ВНИИМИ. Вып 1-2. 1997 г.
3. Колуков В. В. Проектирование электронных систем на основе синтеза и принятия решений. //Журнал “Электромагнитные волны и электронные системы”. –М: 2006. № 8. с 45-48
4. Колуков В.В., Сахаров Ю.С., Муратов А.В. Формализация разнородной информации в САПР.// Вестник Воронежского гос. техн. ун-та, том 10, №2, 2014, с.28-31.

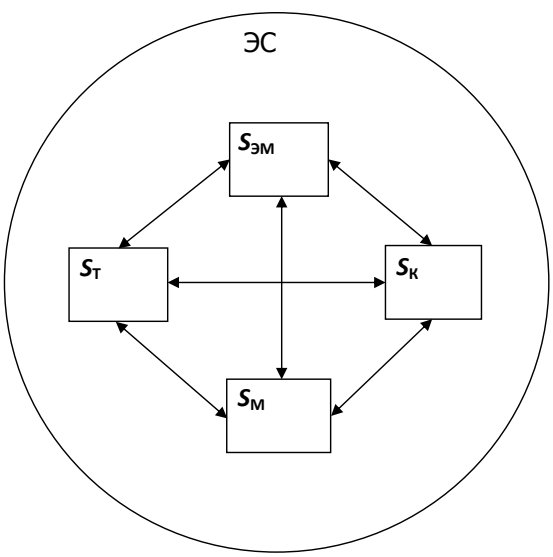


Рис.3. Модель ЭС, $S = \{S_{ЭМ}, S_Т, S_М, S_К, R_S\}$

где $S_{ЭМ}$, $S_Т$, $S_М$, $S_К$ – подсистемы, образующие систему S – ЭС; R_S – отношения между подсистемами.

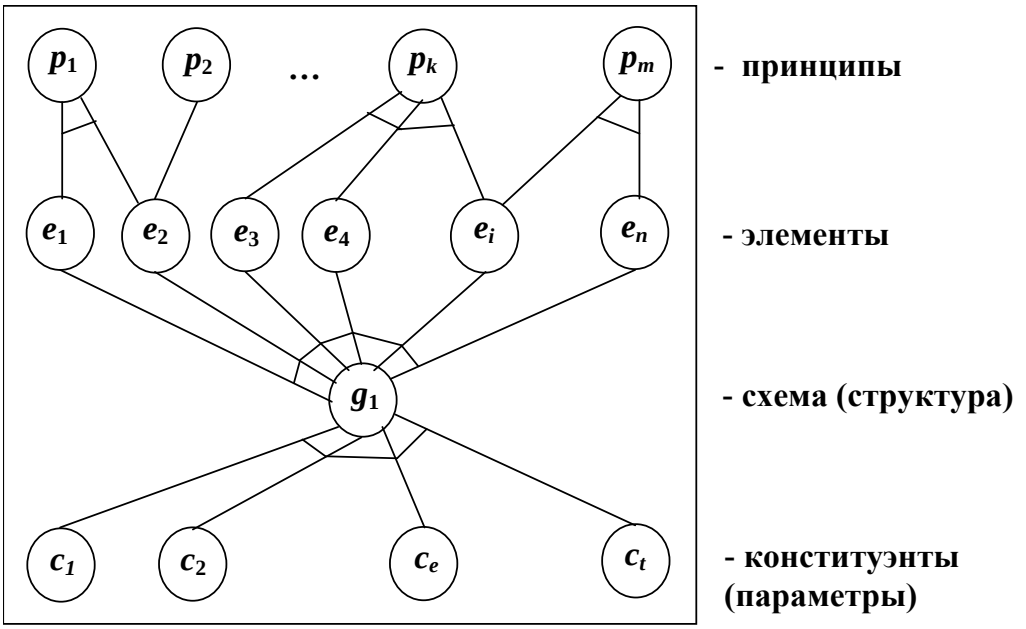


Рис.4. Теоретико-множественная информационная модель ЭС и ее составных частей $S_{ЭМ}$, $S_{Т}$, $S_{М}$, $S_{К}$.

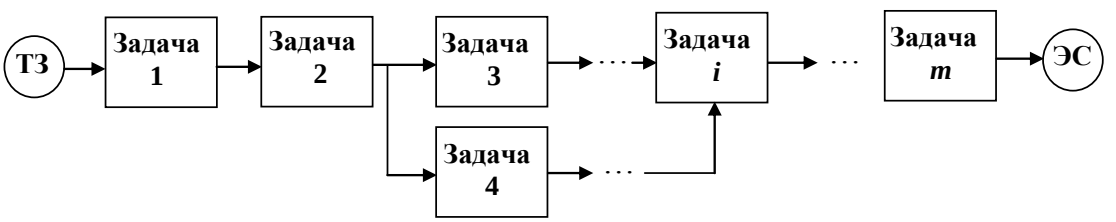


Рис.5. Содержательное представление о проектировании.

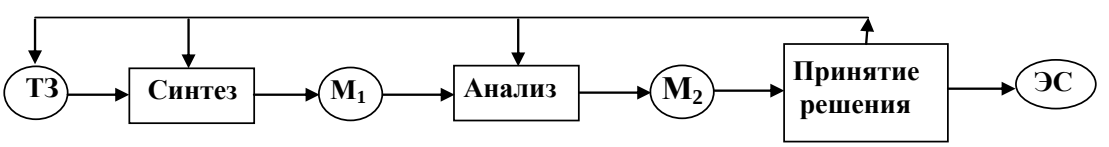


Рис.6. Семантическая модель деятельности проектирования

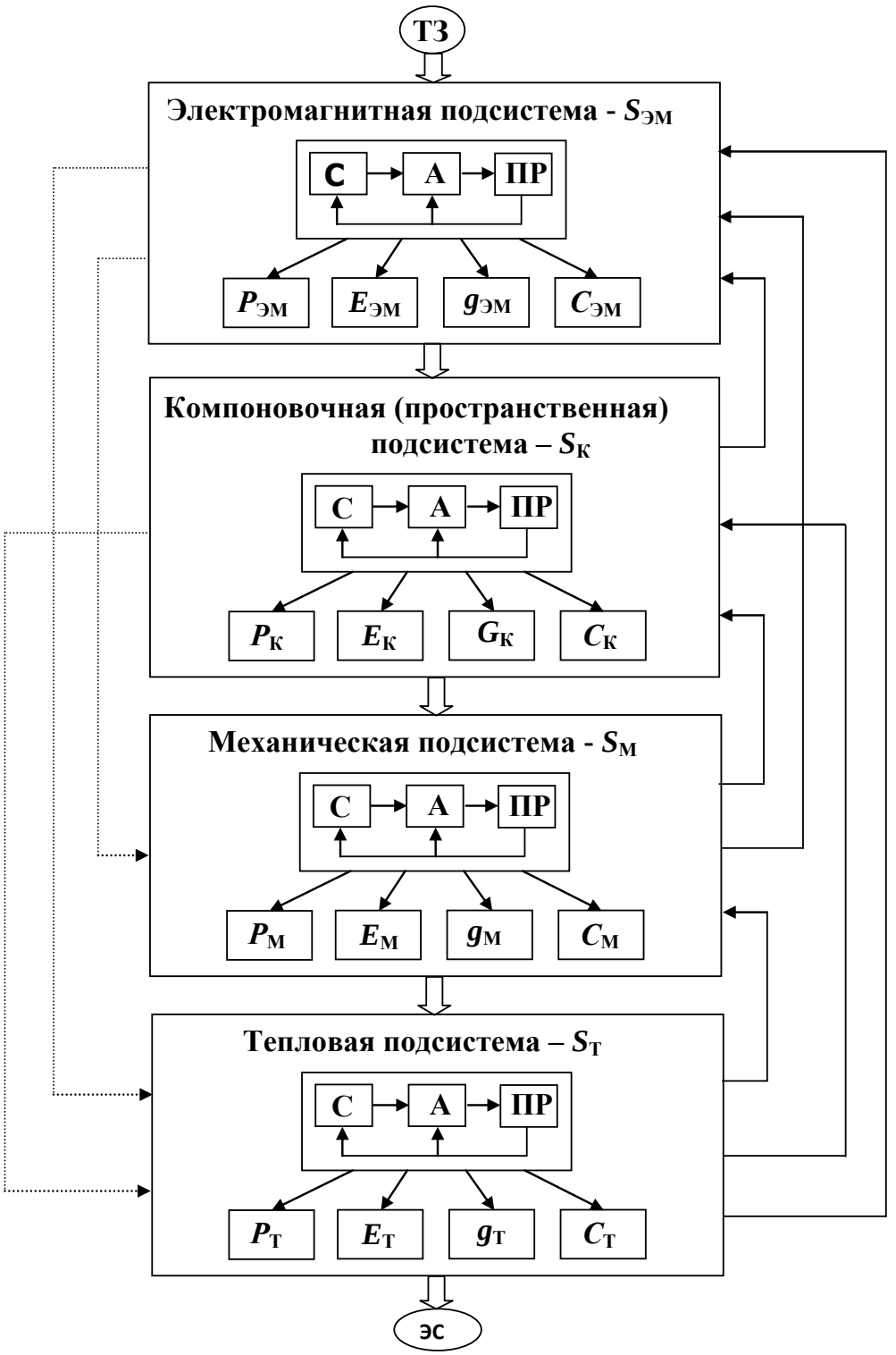


Рис.7. Типовая практическая стратегия проектирования ЭС.

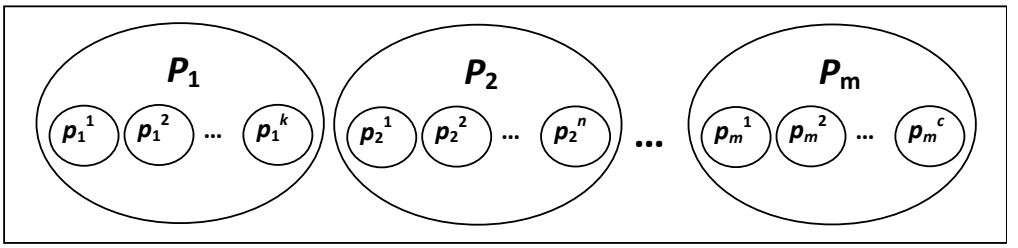


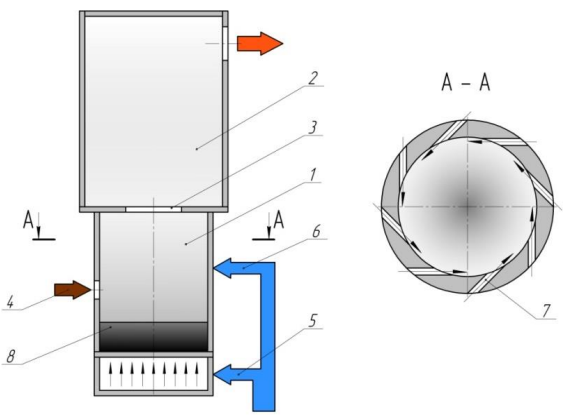
Рис.8. Фрейм «Принципы защиты ЭС от помехи» P_1 – принципы изоляции; $P_1 = \{p_1^1, p_1^2, p_1^3\}$; p_1^1 – отражение; p_1^2 – поглощение; p_1^3 – компенсация; P_2 – принцип повышения устойчивости ЭС; p_2^1 – изменение геометрии ЭС; p_2^2 – выбор материала ЭС; и т. д.

Теплицкий Ю.С., Пицуха Е.А., Кузьмин С.Н., Исьемин Р.Л.

ОПТИМАЛЬНОЕ СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА С ВЫСОКИМ ВЫХОДОМ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь
(pit.ea@mail.ru, tep@hmti.ac.by)
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация

Циклонно-слоевые топки являются одними из эффективных топочных устройств, предназначенных для сжигания топлив с высоким выходом летучих веществ к которым относятся твердые биотоплива. В этих топках (рисунок 1) совмещается слоевое сжигание твердых биотоплив с вихревым дожиганием вынесенных мелких фракций и газообразных горючих продуктов в надслоевом пространстве [1]. Основными преимуществами таких топок по сравнению с традиционными прямоточными слоевыми топками является возможность более качественного вихревого смешения летучих и продуктов неполного горения с дутьевым воздухом, а также сравнительно небольшой объем топочной камеры.



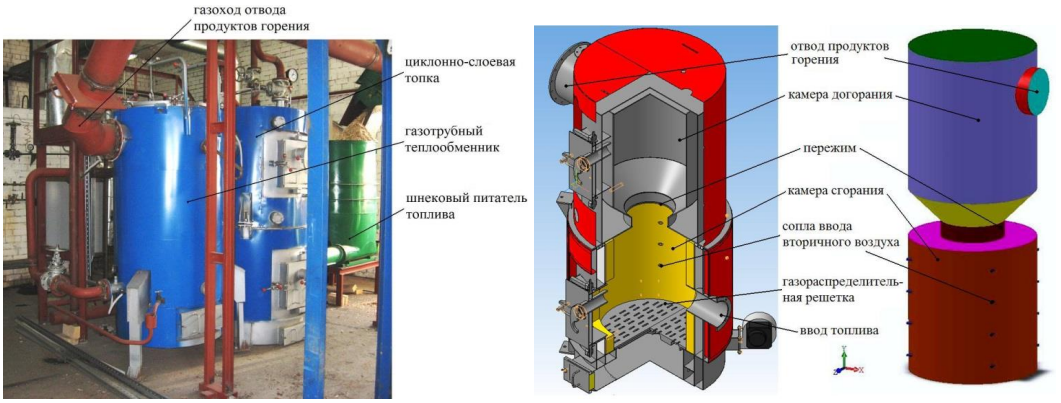
1 – камера сгорания (циклонно-слоевая камера), 2 – камера догорания, 3 – пережим, 4 – ввод топлива, 5 – ввод первичного воздуха (донное дутье), 6 – ввод вторичного воздуха (тангенциальное дутье), 7 – сопла ввода вторичного воздуха, 8 – слой топлива

Рис. 1. Схема циклонно-слоевой топки

Это позволяет организовать процесс сжигания твердых биотоплив с более высокими тепловыми напряжениями топочного объема при низком, нехарактерном для слоевых топок коэффициенте избытка воздуха (α = 1,15 – 1,25) и одновременно небольшом химическом недожоге (q_3).

В общем случае, твердое топливо в топочной камере может сжигаться, как в неподвижном, так и в кипящем слое. Как правило, циклонно-слоевые топки имеют вертикальную компоновку, однако встречается ряд коструктивных решений отличающихся от этой схемы. Например, топка компании Kablitz (Германия) имеет наклонную переталкивающую слоевую решетку и наклонную циклонную камеру, топка компании Bertsch (Германия) с кипящим слоем и вертикальной вихревой призматической камерой. Обзор существующих конструкций показывает, что единичная мощность циклонно-слоевых топок находится в диапазоне примерно от 100 кВт до 10 МВт и применяются они в составе, как бытового котельного оборудования, так и оборудования средней мощности [2, 3]. Под одним котлом может компоноваться несколько циклонно-слоевых камер Wellons (Канада, США) [3].

Опытный образец котла водогрейного малой мощности – 0,5 МВт с циклонно-слоевой топкой (рисунок 2) предназначен для выработки тепловой энергии при сжигании мелкофракционных твердых топлив с высоким выходом летучих веществ (это опилки, щепа, стружка, растительные отходы, фрезерный торф). Котел оснащен газотрубным вертикальным двухходовым теплообменником. Рабочее давление теплоносителя – 0,6 МПа, температурный график – 115-70 ^{0}С. Топка котла двухкамерная, включающая камеру сгорания с внутренним диаметром D = 700 мм, высотой H_1 = 750 мм и камеру догорания такого же диаметра высотой H_2 = 980 мм. Камеры разделены пережимом диаметром d = 350 мм. Первичный воздух (донное дутье) подводится под неподвижную газораспределительную решетку (колосник) с живым сечением 11%. Вторичный воздух вводится в камеру сгорания тангенциально через 16 сопел с внутренним диаметром d_n = 15 мм, расположенных в четыре ряда равномерно по поверхности стенки этой камеры (рисунки 2б, в).



а **б** **в**

Рис.2. Котел водогрейный газотрубный мощностью 0,5 МВт (а),
3-D модель циклонно-слоевой топки (б), конфигурация топочного объема (в)

Для повышения температуры топочного пространства цилиндрическая стенка камеры сгорания выполнена футерованной. Конструкция теплоизоляции этой камеры включает зернистый продуваемый слой – активную теплоизоляцию [4]. Толщина зернистой засыпки δ = 85 мм. В качестве зернистого материала применен аглопорит. Для продувки используется вторичный воздух который после фильтрации в зернистом слое подводится к соплам вторичного дутья. Ввод топлива организован с помощью шнекового питателя сверху на колосниковую решетку, реализуя схему сжигания со встречным движением топлива и продуктов горения (рисунки 2а, б).

При испытаниях котла было опробовано сжигание древесных топлив - опилок, стружки, щепы в широком диапазоне рабочей влажности $W^{р}$ = 7 – 55% ($Q^{р}_{н}$ = 1685-4110 ккал/кг, $A^{с}$ = 1 – 3%), фракционным составом примерно от 1 мм до 10×20×60 мм и насыпной плотностью ρ = 100 – 340 кг/м^3. Также использовались растительные отходы – льнокостра, имеющая рабочую влажность $W^{р}$ = 11,5% ($Q^{р}_{н}$ = 3861 ккал/кг) и насыпную плотность ρ =118 кг/м^3. Длина частиц примерно 15мм. Зольность льнокостры на сухую массу составляла около $A^{с}$ = 3%. Мощность котла (N) варьировалась в диапазоне от 50 – до 100% номинальной (N_{nom} = 0,5 МВт). Доля донного дутья при сжигании древесных топлив составляла φ = 0,3 – 0,62. При сжигании льнокостры доля донного дутья выбиралась из диапазона φ = 0 – 0,35.

Для всех топлив в диапазоне этих режимных параметров получен устойчивый процесс горения. Тепловое напряжение для топки в целом при номинальной мощности составляло примерно q_V = 930 кВм/м^3 и для камеры сгорания – q_{V1} = 2330 кВт/м^3, тепловое напряжение зеркала горения – q_R = 1460 кВт/м^2. Температура отходящих газов за топкой в номинале составляла T_{ch} = 790 – 915 ^{0}С. Более низкие значения температуры соответствовали влажным топливам. Характерные графики зависимости температуры на выходе топочной камеры от мощности котла для топлив различной влажности приведены на рисунке 3.

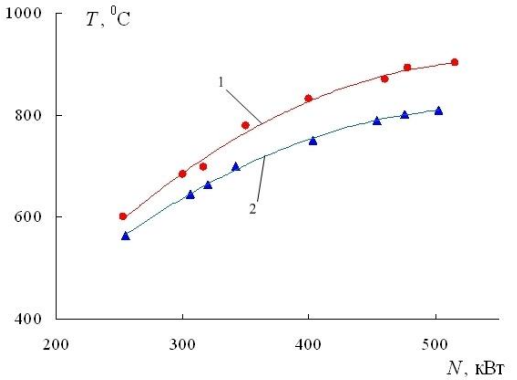
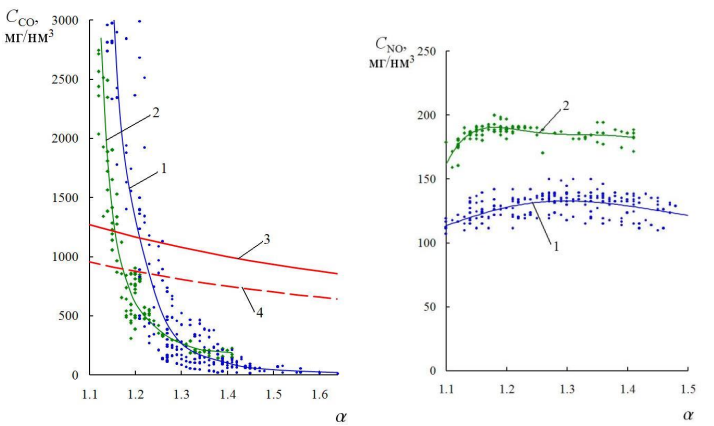


Рис.3. Зависимость температуры за топкой от мощности котла (α = 1,3)

1 – льнокостра $W^{р}$ = 11,5%, 2 – щепа $W^{р}$ = 55%

Были выполнены измерения концентрации кислорода (O_2), монооксидов углерода (CO) и азота (NO) в отходящих газах (C_{O2}, C_{CO}, C_{NO}). Измерения выполнялись, как для древесных топлив различного фракционного состава и влажности, так и для льнокостры. Изменялись и режимные параметры, такие как мощность (N) и доля донного дутья (φ). В качественном отношении зависимости концентраций $C_{CO}(\alpha)$ и $C_{NO}(\alpha)$ аналогичны полученным ранее (рисунок 4) на экспериментальной установке – воздухоподогревателе мощностью N_{nom} = 16,5 кВт, также оснащенном двухкамерной циклонно-слоевой топкой с похожей конфигурацией.



а **б**

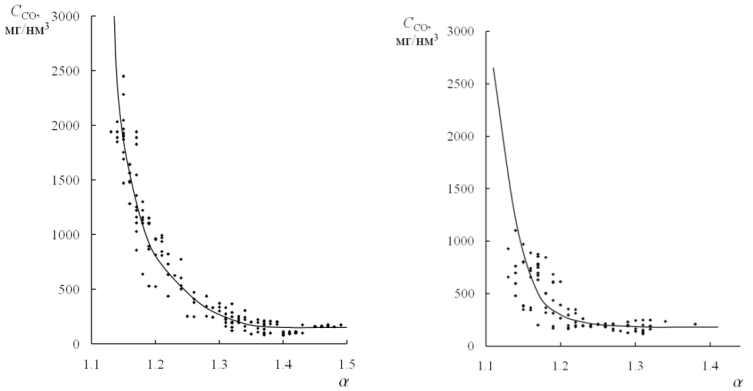
1 – экспериментальная установка (16,5 кВт, $W^{р}$ = 40%), 2 – котел 0,5 МВт ($W^{р}$ = 54%), 3 – нормативные значения концентрации CO согласно [5] для котлов мощностью 0,3 – 2,0 МВт, 4 – для котлов мощностью 2 – 25 МВт

Рис. 4. Концентрации монооксидов углерода (CO) (а) и азота (NO) (б) в отходящих газах экспериментальной установки [1] и котла мощностью 0,5 МВт в зависимости от коэффициента избытка воздуха (α) при сжигании щепы

Примечательно то, что подтверждаются полученные ранее результаты на экспериментальной установке значительно меньшего масштаба в отношении невысоких значений избытка воздуха и концентрации (CO) (мощность топки экспериментальной установки в 34 раза меньше мощности топки котла). Концентрации (CO) в отходящих газах примерно одинаковы для древесных топлив различного фракционного состава и влажности. Наблюдается некоторое снижение содержания (CO) при увеличении доли тангенциально вдуваемого воздуха (рисунок 5).

Ранее на экспериментальной установке при снижении мощности до 50% от номинальной было установлено существенное увеличение концентрации (CO) и избытка воздуха (рисунок 6а). Объяснялось это снижением закрутки и соответственно ухудшением условий смешения. Примерно такая же тенденция наблюдается и для котла мощностью 0,5 МВт. При работе котла на мощности примерно 70 – 100% от номинальной, наблюдается сравнительно низкая концен-

трация (СО) и невысокие значения коэффициента избытка воздуха (рисунки 4а, 5, 7а). При мощности 50 – 60% от номинала содержание (СО) и избыток воздуха увеличивались, но не так существенно как на экспериментальной установке (рисунок 6б).

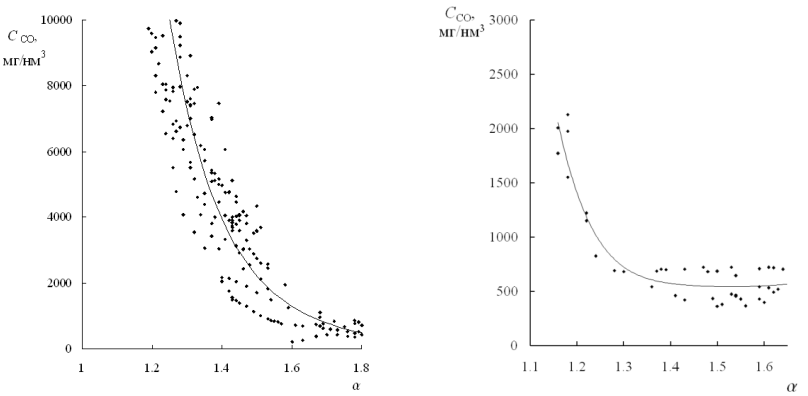


а **б**

а – φ = 0,62, $W^{р}$ = 50,5%; б – φ = 0,5, $W^{р}$ = 55,1%,

Рис.5. Концентрации монооксида углерода (СО) в отходящих газах котла мощностью 0,5 МВт в зависимости от избытка воздуха ($N = N_{nom}$)

При сжигании льнокостры зафиксировано увеличение концентрации монооксида углерода. Испытания котла на льнокостре проводились при доле донного дутья примерно φ = 0,35, а также без донного дутья.



а **б**

а – экспериментальная установка (16,5 кВт, φ = 0,5, $W^{р}$ = 40%, $N = 0{,}5N_{nom}$),

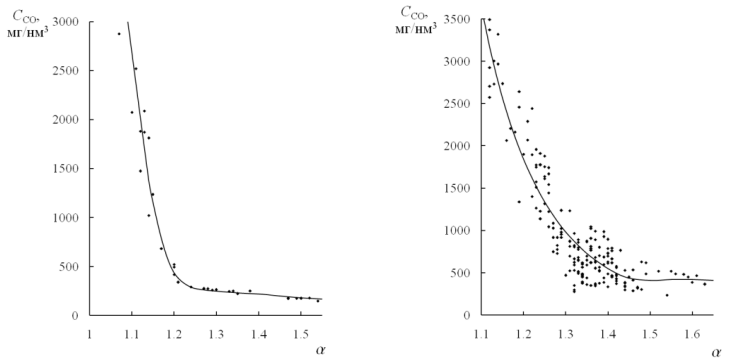
б – котел 0,5 МВт (φ = 0,3, $W^{р}$=18,1%, $N = 0{,}55N_{nom}$)

Рис. 6. Концентрация монооксида углерода (СО) в отходящих газах экспериментальной установки [1] и котла мощностью 0,5 МВт в зависимости от избытка воздуха при сниженной мощности

Установлено, что наиболее низкие значения (СО) наблюдаются при отсутствии донного дутья. Однако, даже в этом случае, содержание (СО) примерно в 1,7 – 2,5 раза выше по сравнению с древесным топливом (рисунок 7б).

Вероятной причиной этого является выгорание большей доли частиц льнокостры в объеме камеры, в то время как частицы древесного топлива в основном выгорают в слое. Соответственно время нахождения продуктов пиролиза и неполного горения в объеме топки меньше при сжигании льнокостры.

Концентрация монооксида азота (NO) в отходящих газах котла мощностью 0,5 МВт, как на влажных, так и сухих древесных топливах примерно в 1,5…1,8 раза выше, чем на выходе экспериментальной установки (рисунки 4б, 8а).

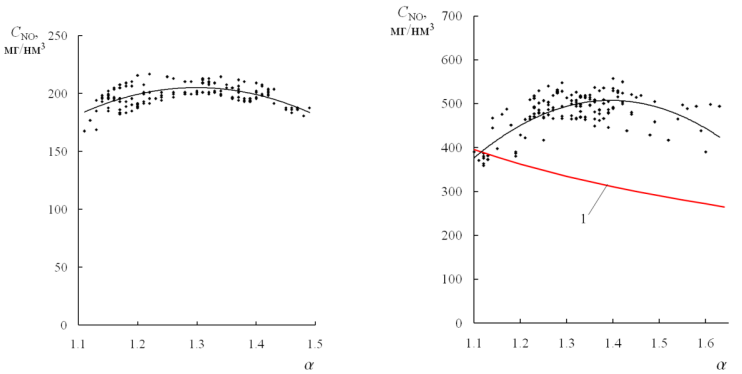


а **б**

а – φ = 0,4, $W^{р}$ = 18,1%, N = 0,75N_{nom}, б – φ = 0, $W^{р}$ = 11,5%, N = 0,86N_{nom}

Рис.7. Концентрации монооксида углерода (CO) в отходящих газах котла мощностью 0,5 МВт в зависимости от избытка воздуха при сжигании щепы (а) и льнокостры (б)

По-видимому, это связано с более высоким тепловым напряжением зеркала горения и соответственно более высокой температурой слоя топлива. Тепловое напряжение зеркала горения в данном случае в 2,8 раза выше чем при сжигании в экспериментальной установке. При снижении мощности котла до 50% от номинальной содержание (NO) уменьшалось примерно на 15 – 20%. Для опробованных древесных топлив концентрация монооксида азота всегда была ниже значений регламентированных нормативом СТБ1626 «Установки котельные работающие на биомассе» [5]. Иная ситуация складывается при сжигании льнокостры. Несмотря на то, что температура за топкой при сжигании льнокостры примерно соответствует температуре при работе на сухих древесных топливах, концентрация монооксида азота (NO) приблизительно в 2 – 2,5 раза выше, чем для древесины (рисунок 8б). Это связано, вероятно, с более высоким содержанием топливного азота в льнокостре.



а **б**

а – φ = 0,62, $W^{р}$ = 50,5%, N = N_{nom} ; б – φ = 0, $W^{р}$ = 11,5%, N = 0,86N_{nom}

1 - нормативные значения концентрации NO [5] для котлов мощностью 2 – 25 МВт

Рис.8. Концентрация монооксида углерода (NO) в отходящих газах котла мощностью 0,5 МВт в зависимости от избытка воздуха при сжигании щепы (а) и льнокостры (б)

Традиционно при представлении циклонных топок заявлялось об их положительном сепарационном эффекте, т.е. способности удерживать твердые частицы топлива в камере до полного выгорания. Однако, как показывают эксперименты на данном опытном образце котла, при сжигании твердого биотоплива ситуация с уносом не так идельна. Факторы здесь следующие. Первое это то, что в циклонной камере формируется очень неравномерный профиль продольной, радиальной и тангенциальной скоростей. В приосевой области, продольная скорость имеет высокие значения, что приводит к выносу твердых частиц со слоя в центральной части камеры сгорания. Частицы при этом движутся вертикально вверх, в направлении пережима практически не

вовлекаясь в вихревое движение, поскольку тангенциальная скорость в приосевой зоне близка к нулю (рисунок 9).

Наличие так называемых торцевых перетечек [6 – 8] способствует перемещению частиц топлива с периферии камеры около слоя и верхней торцевой стенки в центральную часть и последующий вынос этих частиц. Вторым фактором является высокая парусность и низкая плотность коксовых частиц твердых биотоплив.

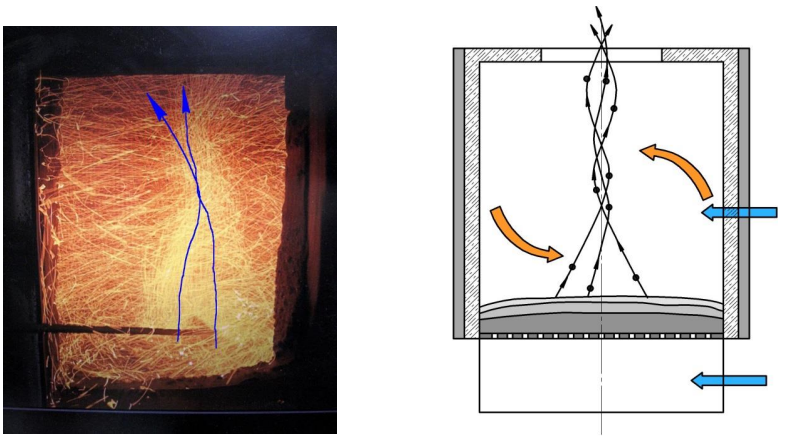


Рис.9. Характер и схема выноса твердых частиц из камеры сгорания в центральной области

Исследование уноса показывает, что он состоит из частично выгоревшего топлива и золы. Свежее топливо в уносе отсутствует. Примерно 30% от массы частиц удаляемых из топки составляет унос, остальная часть это зола, которая скапливается на колоснике и провал. Тем не менее, потери тепла от мехнедожога топлива оцениваются на уровне q_4 = 0,7 – 1,5%, как для древесных топлив, так и для льнокостры, что является небольшой величиной. Из них потери с уносом из топки около 80…95% и соответственно 5…20% от провала в подколосниковое пространство. Коэффициент полезного действия котла, в зависимости от влажности топлива, оце нивается на уровне η = 87…90%.

О состоянии золы на колосниковой решетке. При сжигании древесных топлив спеки (агломераты) на колоснике, как правило, не образовывались. Зола была мелкофракционная и имела вид порошка. Однако в определенных условиях, когда доля донного дутья составляла более примерно 50% и древесное топливо было забаластировано минеральными включениями (в нашем случае песком попавшим при подборе и перегрузке топлива) спеки образовывались.

Особенностью топлив из растительных отходов, в том числе льнокостры является наличие легкоплавкой золы. Температура начала деформации золы льнокостры – 735 – 820 ^{0}С, жидкоплавкого состояния 1175 – 1330 ^{0}С. При доле донного дутья φ = 0,35 на газораспределительной решетке образовывались прочные спеки золы (рисунок 10а), которые покрывали практически весь колосник. В нижней части камеры на цилиндрической стенке имелись непрочные, рыхлые отложения золы на высоте примерно до 300 мм.

а **б**

(а) – φ = 0,35; (б) - φ = 0

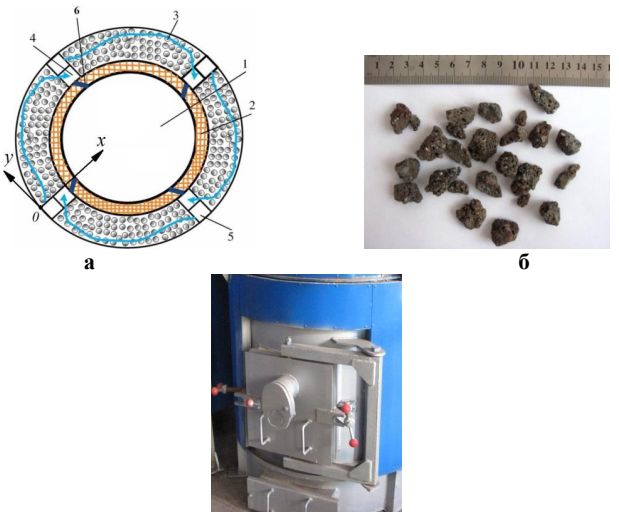
Рис.10. Состояние золы на колосниковой решетке при сжигании льнокостры

Во втором случае, т.е. при отсутствии донного дутья ($\varphi = 0$) картина состояния золы заметно изменилась. На колоснике находилась зола в основном в сыпучем состоянии, агломераты практически отсутствовали, были непрочными и небольших размеров (рисунок 10б). На цилиндрической стенке, в нижней ее части, также имелись непрочные отложения золы. Выше и на охлаждаемых теплоносителем (водой) стенках камеры сгорания и в камере догорания отложения золы отсутствуют (рисунок 11).

а б в

Рис. 11. Вид камеры сгорания непосредственно после монтажа котла (а), отложения золы на стенках камеры сгорания и колоснике при сжигании льнокостры ($\varphi = 0$) (б), вид верхней части стенки камеры сгорания и охлаждаемых водой поверхностей около пережима (в)

Активная теплоизоляция была применена в составе ограждения камеры сгорания. Изнутри камера выложена шамотным кирпичом, затем расположен кольцевой слой продуваемого зернистого материала с системой воздухораспределения, включающей четыре вертикальных коллектора (рисунок 12а). Размеры частиц аглопорита зернистой засыпки составляли – 15 – 20 мм (рисунок 12б). Снаружи находится минераловатная изоляция и обшивка. Общая толщина ограждения камеры – 230 мм. Испытания котла при различных соотношениях донного и тангенциального дутья подтвердили эффективность этой схемы тепловой изоляции. Температура обшивки не превышала 30 ^{0}С. Более высокие значения температуры, наблюдались в локальной области вокруг смотрового люка на расстоянии менее 150 мм и связаны, вероятно, с наличием в ней непроточных зон (рисунок 12в). Распределение температуры внутри стенок камеры приведено на рисунке 13. При продувке зернистого одновременно обеспечивается подогрев вторичного воздуха. Как показывают расчеты согласно разработанной модели теплопередачи в зернистом материале, а также численное моделирование в пакете Fluent, величина подогрева составляет примерно 80 – 120 ^{0}С [4].



а б

в

1 – камера сгорания, 2 – футеровка, 3 – зернистый слой, 4 – коллектор подогретого воздуха, 5 – коллектор холодного воздуха

Рис. 12 – Схема активной теплоизоляции камеры сгорания (а), частицы зернистого слоя (аглопорит) – (б), область около смотрового люка с повышенной температурой обшивки (в)

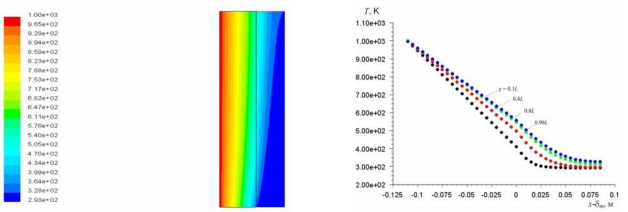


Рис.13. Распределение температуры внутри стенок камеры сгорания (К)

Основные выводы:

1. Для твердых биотоплив различного фракционного состава в широком диапазоне влажности ($W^{р}$ = 7 – 55%, $Q^{р}_{н}$ = 1685-4110 ккал/кг) получено устойчивое горение в циклонно-слоевой топке котла малой мощности;

2. Установлено, что при мощности котла примерно 70 – 100% от номинальной, соответствие нормативным значениям концентрации (CO) выполняется при избытке воздуха α = 1,15-1,25. При меньшей мощности, примерно 50 - 60% от номинала, нормативные значения концентрации монооксида углерода (CO) реализуются при избытке α = 1,27 и выше.

3. Режим сжигания льнокостры целесообразно устанавливать без донного дутья. В этом случае содержание (CO) наименьшее, практически отсутствуют агломераты на колоснике. Концентрация монооксида азота (NO) в отходящих газах при сжигании льнокостры в 2 – 2,5 раза выше чем при сжигании древесины.

4. Подтверждена эффективность активной теплоизоляции камеры сгорания топки котла. В основном температура обшивки не превышала 30^{0}C за исключением поверхности на периферии смотрового люка, где наблюдались более высокие температуры.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A^{c} – зольность топлива на сухую массу, %; C_{CO} – концентрация монооксида углерода (CO) в отходящих газах, мг/нм^3; C_{NO} – концентрация монооксида азота (NO), мг/нм^3; C_{O2} – концентрация кислорода (O_2), %; D – диаметр камер сгорания и догорания, мм; d – диаметр пережима, мм; d_n – диаметр сопла вторичного дутья, мм; H_1 – высота камеры сгорания, мм; H_2 – высота камеры догорания, мм; L – длина зернистого слоя, м (по окружности); N – мощность, МВт, N_{nom} – мощность номинальная, МВт; $Q^{р}_{н}$ – низшая теплота сгорания, ккал/кг; q_R – тепловое напряжение зеркала горения, кВт/м^2; q_V – тепловое напряжение объема топочной камеры, кВт/м^3; q_3 – потери тепла с химическим недожогом топлива, %; q_4 – потери тепла с механическим недожогом, %; T – температура зернистого слоя, К; T_{ch} – температура газов за топкой, ^{0}C; $W^{р}$ – рабочая влажность топлива, %; α – коэффициент избытка воздуха за топкой; δ – толщина зернистого слоя, мм; δ_m – толщина слоя футеровки, мм; η – коэффициент полезного действия котла; ρ – насыпная плотность, кг/м^3; φ – доля донного дутья.

Индексы: нижние: ch – топка; CO – монооксид углерода, NO – монооксид азота, m – футеровка; n – сопло; nom – номинальный; R – зеркало горения, V – топочный объем, н – низшая; верхние: р – рабочая масса, с – сухая масса.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Е.А. Пицуха, Ю.С.Теплицкий, В.А. Бородуля. Сжигание твердых биотоплив в циклонно – слоевой топочной камере // Теплоэнергетика. – 2014 - №7. – С. 18 – 24.

[2] Nussbaumer T. Combustion and co-combustion of biomass: Fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction // Energy & Fuels. 2003. No. 17. − P. 1510−1521.

[3] Energy: Wellons Combustors / Wellons Canada [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.wellons.com/steamboilersystems.html, http://www. wellons.com/thermaloilsystems.html, http://www.wellons.ca/energycombustors.html – Date of access: 20.09.2015.

[4] Yu. S. Teplitsky, E. A. Pitsukha, V. A. Borodulya, V. L. Malevich. Active Thermal Insulation of High-Temperature Surfaces of Technological Equipment Based on Packed Beds // Applied Physics Research. – 2014 – Vol. 6, № 5. – P. 82–99.

[5] Установки котельные. Установки, работающие на биомассе. Нормы выбросов загрязняющих веществ : СТБ 1626.2-2006. – Введ. 19.04.2006. – Минск : Госстандарт РБ, 2006. – 3 с.

[6] М.И. Девятерикова, П.М. Михайлов. К вопросу о влиянии торцевых перетечек на аэродинамику вихревой камеры // Тр. ЛПИ. Энергомашиностроение. – 1968. Вып. 297. – С. 52 – 57.

[7] М.И. Девятерикова, П.М. Михайлов. О влиянии геометрии вихревой камеры на торцевые перетечки // Тр. ЛПИ. Энергомашиностроение. – 1969. Вып. 310. – С. 122–126.

[8] Пицуха, Е.А. Численное моделирование течений в циклонной камере с различными условиями ввода и вывода воздуха / Е.А. Пицуха // ИФЖ. – 2014 – Т. 87. – №5 – С. 985 – 992.

Шахнов В.А., Семенцов С.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПОМЕЩЕНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Рассмотрены методы моделирования акустических передаточных функций помещений произвольной формы, содержащих источники шума. Проведен анализ влияния параметров цифрового фильтра, аппроксимирующего передаточную функцию и используемого для процедуры идентификации алгоритма на адекватность получаемой модели.

Создание эффективной системы активного гашения (САГ) шума, производимого различного рода установками и устройствами, требует решения двух задач: физической (акустической) и технической. В результате решения первой задачи определяется необходимое число электроакустических преобразователей системы, а также места их оптимального расположения. Техническая задача заключается в разработке алгоритма управления системой, исходя из спектральных характеристик сигналов первичных источников и характеристик передаточной функции объекта управления. Исходя из этих требований, для гашения акустических полей чаще всего используются классические, оптимальные или адаптивные системы активной компенсации [1].

В классических системах с управлением по возмущению и отклонению параметры блока управления рассчитываются на основе априорной информации о характеристиках объекта управления. При наличии адекватной модели передаточной функции объекта управления, а также при выполнении следующих условий:

- неизменность передаточной функции объекта управления;
- высокая пространственная однородность передаточной функции;
- неизменность и стационарность входного воздействия.

Эффективные САГ могут быть реализованы и по неадаптивной схеме. Для реальных объектов эти условия выполняются лишь для узкого класса систем, например для САГ шума трансформаторов.

В более совершенных оптимальных системах на основе априорной информации о характеристиках объекта управления, сигналах возбуждения и сигналах исходного поля в точках контроля вычисляются такие параметры, которые минимизируют некоторый выбранный критерий управления, например мощность результирующего поля. Априорная информация здесь более полная, поэтому оптимальные системы превосходят по эффективности классические.

Если в процессе работы характеристики объекта управления изменяются в широких пределах, то классические и оптимальные системы становятся малоэффективными. Одним из путей преодоления неполноты априорной информации является применение принципа адаптации. При этом в системе автоматически в ходе ее работы происходит накопление текущей информации об изменяющихся характеристиках объекта управления и возмущающих воздействиях и соответствующая перестройка параметров устройства управления с целью постоянного поддержания в системе максимальной эффективности компенсации.

По сути, в процессе адаптации происходит непрерывная идентификация передаточной функции объекта управления для заданного входного воздействия. Для систем активного гашения шума в помещениях определение передаточной функции объекта управления, даже для нестационарных систем, позволяет значительно повысить эффективность системы. Во-первых, за счет задания массива ненулевых начальных значений перестраиваемого адаптивного фильтра, что позволяет значительно сократить время адаптации. Во-вторых, дает возможность реализовать передаточную функцию в виде неперестраиваемого цифрового фильтра, соединенного по-

следовательно с коротким адаптивным фильтром, отслеживающим только изменения передаточной функции и входного воздействия.

Передаточная функция в общем случае может быть получена двумя путями: методами численного моделирования, например, методами конечно-элементного и гранично-элементного анализа [2] и экспериментально в процессе идентификации объекта управления при случайном входном воздействии методами онлайн и офф-лайн моделирования [3].

В офф-лайн режиме моделирование передаточной функции происходит в процессе настройки адаптивного фильтра (рис. 1). В этом случае необходимо экспериментальное определение реакции объекта управления *y(n)* на случайное входное воздействие *x(n)* при заданном расположении пары источник/приемник. Далее для сигналов *x(n)* и *y(n)* может быть проведена процедура идентификации передаточной функции. При проведении идентификации обычно используется адаптивный алгоритм наименьших средних квадратов (НСК) (рис. 2) .

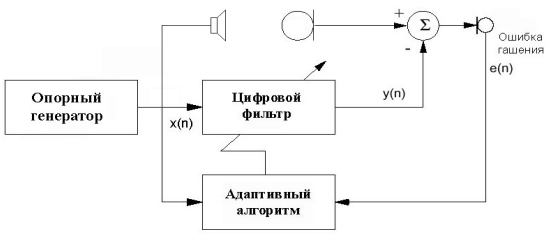


Рисунок 1 - Моделирование передаточной функции

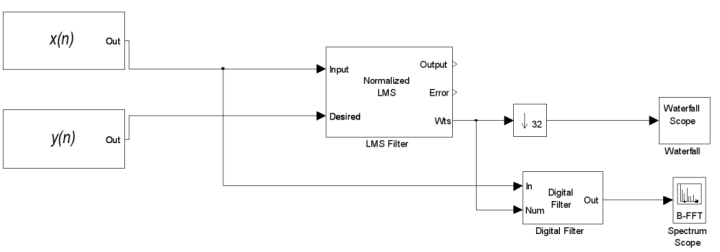


Рисунок 2 - Модель в среде MATLAB для идентификации передаточной функции.

В представленной на рис. 2 модели в процессе настройки адаптивного алгоритма формируется передаточная функция, реализованная в виде цифрового фильтра (блок Digital Filter). Вместе с тем ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не приводятся результаты анализа влияния размерности цифрового фильтра, аппроксимирующего передаточную функцию, и адаптивного алгоритма, используемого в процедуре идентификации, на адекватность получаемой модели.

При анализе размерности цифрового фильтра необходимо учитывать некоторые принципиальные ограничения, накладываемые характером работы САГ в целом. Например, частотный диапазон работы САГ в помещении, как правило, находится в пределах так называемой модальной зоны. В модальной зоне от первой аксиальной моды $f_1 = \frac{340}{2l}$ до $f_2 \approx 2160\sqrt{\frac{RT60}{V}}$ передаточная функция определяется собственными модами помещения и описывается с помощью модального анализа. Частота f_2, называемая частотой Шредера, определяет максимальную частоту, которая может быть адекватно описана с помощью модального анализа. Выше этой частоты модальная плотность настолько велика, что частотная характеристика сигнала *y(n)* становится практически равномерной.

Таким образом, модель передаточной функции должна адекватно описывать передаточную функцию в пределах частотного диапазона от f_1 до f_2, что позволяет существенно сократить порядок фильтра, аппроксимирующего модель, за счет снижения его тактовой частоты до 2 f_2 [4].

Для определения необходимого порядка фильтра и шага адаптации в помещении объемом 100 м^3 для произвольной точки были экспериментально получены сигналы *x(n)* и *y(n)* и далее проведена процедура идентификации с использованием nLMS-, LMS- и RLS-алгоритмов. Исходя из приведенных выше соображений, для данного помещения тактовая частота адаптивных фильтров была выбрана равной 800 Гц.

Для проведения сравнительного анализа адекватности формируемых моделей порядок адаптивных фильтров варьировался в пределах от 128 до 1024 коэффициентов в диапазоне значений шага адаптации μ от 1 до 0,05 для nLMS-алгоритма и диапазоне оценки дисперсии входного сигнала (initial input variance estimate) $\hat{\sigma}^2$ от 0,05 до 1 для RLS-алгоритма. При использовании LMS-алгоритма без нормализации сходимость сохраняется при $\mu < 0{,}2$, поэтому моделирование проводилось для значений $\mu = 0{,}05$ и $\mu = 0{,}1$.

На первом этапе оценивалась максимальная неравномерность спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала ошибки *e(n)* (выход Error адаптивного фильтра на рис. 2). Обобщенная зависимость неравномерности СПМ *e(n)* в дБ от порядка фильтра *n* и шага адаптации μ для nLMS-алгоритма приведена на рис. 3.

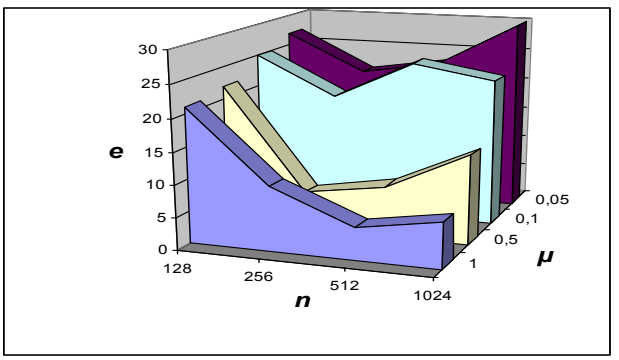


Рисунок 3 - Зависимость неравномерности СПМ сигнала ошибки *e(n)* от *n* и μ для nLMS-алгоритма

В данном случае неравномерность СПМ ошибки варьируется в пределах от 5 до 25 дБ, что является неприемлемым для формирования адекватной модели. Однако, как показали дальнейшие исследования, неравномерность СПМ сигнала ошибки *e(n)* не является определяющей при оценке адекватности формируемых моделей.

На втором этапе была разработана модель в среде MATLAB, позволяющая непосредственно оценить ошибку между полученным экспериментально сигналом *y(n)* и откликом синтезированных моделей в частотной области (рис. 4).

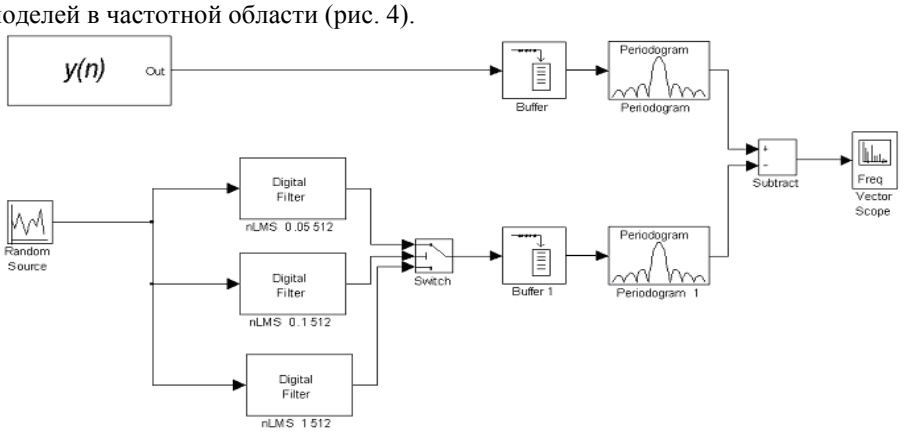


Рисунок 4 - Модель в среде MATLAB для оценки адекватности синтезированных моделей в частотной области

Сравнение модели передаточной функции, полученной с помощью nLMS-алгоритма и описываемой цифровым фильтром длиной 128 коэффициентов, с сигналом *y(n)* приведено на рис. 5. При длине фильтра в 128 коэффициентов точность моделирования недостаточна. Частотная характеристика носит упрощенный характер, амплитуды частотных компонент переданы со значительными ошибками. Ошибка по амплитуде достигает 10 дБ, а по частоте – 10 Гц.

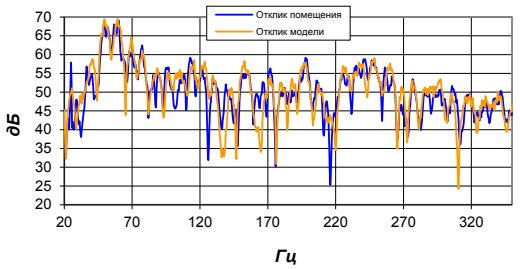


Рисунок 5 - Оценка адекватности модели, полученной с помощью nLMS-алгоритма при μ = 1 и n = 128

При увеличении порядка аппроксимирующего фильтра до 1024 коэффициентов получаемая модель адекватна, ошибки по амплитуде не превышают 4 дБ и 1 Гц по частоте (рис. 6).

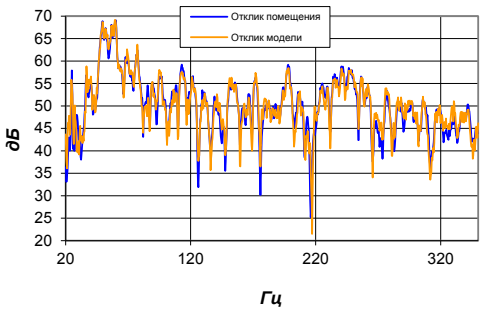


Рисунок 6 - Оценка адекватности модели, полученной с помощью nLMS-алгоритма при μ = 1 и n = 1024

На рис. 7 приведена обобщенная зависимость усредненной амплитуды ошибки в дБ от величины μ и порядка адаптивного nLMS-фильтра – n.

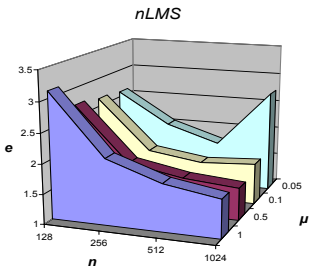


Рисунок 7 - Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины μ и порядка адаптивного nLMS-фильтра

Минимальная амплитуда ошибки достигается при величине $0{,}7<\mu<0{,}5$ и порядках фильтра в диапазоне от 256 до 1024 коэффициентов.

Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины μ и порядка адаптивного LMS-фильтра n приведена на рис. 8.

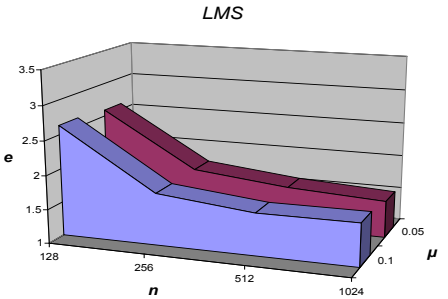


Рисунок 8 - Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины μ и порядка n адаптивного LMS-фильтра.

Для LMS-алгоритма без нормализации полученная зависимость практически идентична nLMS-алгоритму с μ = 0,5.

Проведенный анализ адекватности моделей, полученных с помощью RLS-алгоритма, показал, что амплитуда ошибки не зависит от величины $\hat{\sigma}^2$ и определяется лишь длиной аппроксимирующего фильтра (рис. 9).

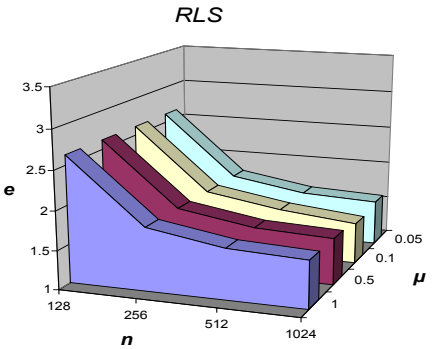


Рисунок 9 - Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины μ и порядка n адаптивного RLS-фильтра

Исходя из полученных данных и ограничений, возникающих при практической реализации фильтров высоких порядков в системах цифровой обработки реального времени, можно сделать следующие выводы:

- для формирования адекватной модели передаточной функции, в зависимости от длины импульсной характеристики, необходим адаптивный цифровой фильтр длиной 256-512 коэффициентов. Применение фильтра длиной 256 коэффициентов является более предпочтительным, поскольку при незначительном увеличении ошибки позволяет существенно снизить требования к аппаратному обеспечению системы;
- для проведения процедуры идентификации могут быть использованы LMS- и RLS-алгоритмы при одинаковой адекватности получаемых моделей. Применимость nLMS-алгоритма сильно зависит от величины μ и требует проведения нескольких итераций.

Список литературы

1. S.H. Kristensen Active Noise Cancellation in Headsets Aalborg University. Institute of Electronic Systems. Applied Signal Processing and Implementation. Technical Report 1998
2. Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family. Application Report. Taxas Instruments. 1996
3. P. Tamaz, J.J. Embrechts. Experiments in active noise control in buildings. Local and global approaches. Department of Electrical Engineering and Computer Science (Institut Montefiore). 2005

Э. Айфичер, С. Джервис Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

Научное издание

ЛЕКЦИИ

3-ей Международной конференции
с элементами научной школы

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Тамбов,
25-27 апреля 2016 года

Материалы, вошедшие в сборник, сохраняют авторскую редакцию.

Издательство Першина Р.В.,
392002, Тамбов, ул. Советская, 21, а/я 7.
email: izdat1@tamb.ru, тел. 8-909-232-81-01.

Формат 84x108/16. Бумага офсетная.
Печать электрографическая. Гарнитура
Times. Объем – 8,5 усл. печ. л. Тираж 300 экз.