

## Краткие сообщения

УДК 621.3.012.5

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Р.А. Алехин<sup>1</sup>, Ю.П. Кубарьков<sup>1</sup>, С.В. Свечкарев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

*Произведен расчет установившегося режима, а также исследованы переходные процессы, протекающие в маломашинной тестовой энергосистеме в ПО PowerFactory и всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем. В установившемся режиме напряжения и перетоки активных и реактивных мощностей оказались в рамках допустимых погрешностей. При моделировании различного рода возмущений алгоритм работы всережимного моделирующего комплекса показал себя как более точный по сравнению с режимом расчета электромеханических переходных процессов в программе PowerFactory и практически идентичен методу расчета электромагнитных переходных процессов, однако благодаря наличию в комплексе аналоговой составляющей существенно повышается скорость выполнения операций, что расширяет диапазон решаемых задач. Высокая эффективность комплекса позволяет сделать вывод о его применимости в различных электроэнергетических компаниях.*

**Ключевые слова:** *установившийся режим, электромагнитный переходный процесс, электромеханический переходный процесс, диспетчерское управление, математическая модель.*

К основным задачам, решаемым в диспетчерских центрах, относятся не только управление режимами работы энергосистем в режиме реального времени, но также и анализ нормальных, аварийных и послеаварийных режимов, проверка функционирования средств релейной защиты и автоматики и многие другие. Кроме того, для поддержания у персонала необходимого уровня квалификации необходим специализированный тренажер, способный в реальном времени моделировать режим работы электрических станций и всей электроэнергетической системы [1].

Но ввиду наличия в энергосистеме большого количества оборудования, представляющего собой нелинейные элементы, расчет динамических процессов в энергосистемах является весьма сложной задачей, требующей применения различных моделирующих комплексов [2]. Современные средства моделирования

---

*Роман Александрович Алехин, аспирант.*

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».*

*Сергей Владимирович Свечкарев (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы».*

можно условно разделить на два класса: цифровые и аналоговые. Цифровые средства используют для получения результата численные методы, которые могут вносить в расчет некоторую погрешность. Для устранения данного недостатка уменьшается шаг интегрирования, а также производится упрощение задачи, то есть разделение ее на расчеты установившихся режимов, электромагнитных и электромеханических переходных процессов [3]. Аналоговые комплексы основаны на математических операциях, выполняющихся на физических элементах – операционных усилителях. Их существенными недостатками являются большие габариты и потребляемая мощность вычислительных машин, но выполнение операций интегрирования и нелинейных операций производится методически точно.

Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) является гибридной системой, вобравшей в себя преимущества каждого из описанных выше способов моделирования. Процессы в ВМК РВ ЭЭС моделируются непрерывно и в реальном времени, поэтому моделирование начинается в тот момент времени, в который запускается сценарий динамики без задержки из режима, который существует в данный момент.

Для анализа применимости ВМК РВ ЭЭС при решении задач диспетчерского управления использовался программный продукт для расчетов установившихся и динамических режимов PowerFactory от компании DlgSILENT GmbH (Германия), зарекомендовавший себя во всем мире.

Для сравнительных расчетов установившихся режимов в программе PowerFactory и всережимном моделирующем комплексе реального времени были смоделированы одинаковые схемы тестовой энергосистемы.

Расчет установившегося режима в Power Factory и определение параметров состояния динамической модели ВМК РВ ЭЭС в квазиустановившемся режиме показали различия напряжений в комплексах менее 1 % и мощностей в диапазоне  $\pm 3$  МВт (Мвар), являющиеся допустимыми в рамках данного исследования.

Для сравнения расчетов динамических режимов в комплексах PowerFactory и ВМК РВ ЭЭС был смоделирован случай трехфазного автоматического повторного включения после отключения короткого замыкания на одной из линий энергосистемы с последующей импульсной разгрузкой и ограничением мощности турбогенераторов на близлежащей станции. После неуспешного АПВ возникает опасность наступления асинхронного хода генератора. В этом случае действует автоматика предотвращения нарушения устойчивости параллельной работы генератора с сетью и производится глубокая импульсная разгрузка с последующим ограничением мощности.

## **Выводы**

1. Полученные во всережимном моделирующем комплексе осциллограммы практически идентичны осциллограммам в ПО PowerFactory при моделировании электромагнитных процессов, а результаты расчетов электромеханических процессов заметно отличаются от остальных. Это объясняется тем, что моделирование электромеханических процессов связано с некоторым упрощением математических моделей элементов энергосистем, а также с довольно большим шагом интегрирования, которые вносят погрешность в расчеты. Моделирование электромагнитного процесса отличается высокой точностью расчета параметров энергосистемы, использует меньший шаг интегрирования, но также и большее количество итераций, что приводит к увеличению времени выполнения опера-

ции. Время проведения расчета переходного процесса тестовой энергосистемы составило 15 минут, а для крупных энергосистем этот показатель может сильно увеличиться.

2. ВМК РВ ЭЭС, обеспечивая высокую точность вычислений, совершает эти операции в режиме реального времени, что позволяет использовать данный комплекс при исследовании режимов работы крупных энергосистем, а также для проведения тренировок персонала диспетчерских центров по управлению энергосистемами и устранению аварийных ситуаций. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что гибридная моделирующая система, в частности всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем, применима при решении задач диспетчерского управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровиков Ю.С., Прохоров А.В., Сулайманов А.О. Всережимный моделирующий комплекс реального времени и его использование для решения задач управления в ИЭС ААС // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 01 (06). – С. 54–59.
2. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
3. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9. – 10/1. – С.164–170.

*Статья поступила в редакцию 16 июня 2017 г.*

## ANALYSIS OF APPLICABILITY OF HYBRID MODELING SYSTEMS FOR PROBLEMS OF DISPATCHING MANAGEMENT

**R.A. Alehin<sup>1</sup>, Y.P. Koubarkov<sup>1</sup>, S.V. Svechkarev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Avenue, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation

*Calculations of the steady-state regime are carried out, as well as the processes taking place in the simulation of electromagnetic and electromechanical transients in a small-scale test power system in the PowerFactory software and in the hybrid real-time power system simulator. In steady-state conditions, the voltages and active and reactive power flows were within the permissible errors. In the simulation of various kinds of disturbances, the algorithm of the hybrid real-time power system simulator has proved to be more accurate than the electromechanical transient calculation mode in the PowerFactory program and is almost identical to the method for calculating electromagnetic transients. However, due to the presence of an analog component in the complex, the speed of operations is significantly increased, which expands the range of tasks solved by the hybrid real-time power system simulator. High efficiency of the complex allows us to conclude that it is applicable in various power companies.*

**Keywords:** *steady-state regime, electromagnetic transient, electromechanical transient, dispatching control, mathematical model.*

---

Roman A. Alehin, Postgraduate Student.

Youry P. Koubarkov, (D. Techn), Professor.

Sergey V. Svechkarev (Ph. D. (Techn.)), Assistant Professor.

УДК 681.5.015

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА\*

*И.А. Данилушкин, А.А. Желандинова, С.А. Колпащиков, В.К. Тянь*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Статья посвящена разработке и сравнению статических моделей установки охлаждения газа. В качестве исходных данных использовались мгновенные значения технологических параметров работы установки, фиксировавшиеся в течение шести лет с двухчасовым интервалом. Выполнен предварительный отбор данных, соответствующих рабочему режиму. Реализованы модели, базирующиеся на регрессионном анализе, решении уравнения теплопередачи, алгоритме ближайшего соседа. Проведена оценка погрешности полученных моделей.*

**Ключевые слова:** установка охлаждения газа, статический режим, регрессионный анализ, аналитическая модель, прецедентная модель, метод ближайшего соседа.

Транспортировка газа по магистральным трубопроводам осуществляется с помощью компрессорных станций, которые повышают давление газа. Вместе с давлением растет и температура газа, поэтому после компрессорного цеха газ поступает в установку охлаждения газа (УОГ), состоящую из нескольких параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1]. Для интенсификации отвода тепла АВО газа оснащены вентиляторами с электроприводами.

Задача повышения эффективности транспортировки газа может быть решена за счет перераспределения энергозатрат между несколькими смежными компрессорными станциями, что приведет к суммарному снижению потребления энерго-ресурсов. Для решения задачи в такой постановке необходима комплексная модель процесса транспортировки газа, описывающая все основные технологические процессы: компримирование, охлаждение, транспортировку по линейному участку. Эта статья посвящена вопросам моделирования установки охлаждения газа.

Функционирование УОГ определяется множеством факторов, часть из которых представляет собой неизменяемые значения параметров окружающей среды, а часть определяется состоянием технологического оборудования.

В статье обсуждаются результаты создания различных моделей УОГ по данным эксплуатации технологического объекта. В качестве исходных данных выступают:

– объемный расход газа через УОГ;

---

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-03053-а.*

*Иван Александрович Данилушкин (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управления в техниках».*

*Александра Андреевна Желандинова, аспирант.*

*Сергей Александрович Колпащиков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управления в технических системах».*

*Владимир Константинович Тянь (д.т.н.), заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт».*

- давление газа перед УОГ;
- температура газа на входе УОГ;
- температура газа на выходе УОГ;
- температура воздуха;
- количество включенных вентиляторов.

Данные получены по результатам шести лет эксплуатации установки, мгновенные значения параметров регистрировались с двухчасовым интервалом. Длительность переходных процессов при смене режима работы УОГ не превышает пяти минут, поэтому принимается, что имеющиеся данные соответствуют стационарным состояниям.

В процессе предварительного анализа данных были исключены ситуации, когда отсутствовал расход газа через установку, а также ситуации, при которых вентиляторы должны быть выключены:

- температура воздуха выше температуры газа на входе;
- температура газа на выходе выше температуры газа на входе.

Цель создания модели – определение числа включенных вентиляторов для достижения заданных параметров функционирования УОГ или максимально возможного приближения к ним. В дальнейшем полученная модель будет использоваться для решения задач повышения энергоэффективности процесса транспортировки газа.

Таким образом, в качестве выхода модели выступает количество включенных вентиляторов, которое определяется по параметрам газа на входе УОГ (расход, давление, температура), температуре газа на выходе УОГ и температуре воздуха.

Проведен сравнительный анализ нескольких моделей.

1. Регрессионная модель [2] предполагает линейную зависимость выхода модели от всех входов. Коэффициенты зависимости рассчитаны согласно выражению

$$\mathbf{k} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B} = [N_{ABO_i}]_{n \times 1}$  – вектор, содержащий сведения о количестве включенных вентиляторов АВО в  $i$ -той ситуации,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  – количество ситуаций,  $\mathbf{A}$  – матрица, составленная из векторов входных параметров модели:

$$\mathbf{A} = [1 \quad F_i \quad P_i \quad \theta_{in_i} \quad \theta_{out_i} \quad T_{air_i}]_{n \times 6}, \quad (2)$$

где для каждой  $i$ -той ситуации известны:  $F_i$  – объемный расход газа через УОГ,  $P_i$  – давление газа на входе УОГ,  $\theta_{in_i}$ ,  $\theta_{out_i}$  – температура газа на входе и выходе установки,  $T_{air_i}$  – температура воздуха.

Полученные коэффициенты  $\mathbf{k} = [k_i]_{6 \times 1}$  используются для расчета количества включенных вентиляторов при заданных условиях работы УОГ и, в частности, для оценки погрешности модели по имеющимся данным:

$$\mathbf{B}^* = \mathbf{A} \cdot \mathbf{k}, \quad (3)$$

$$Err = \sum_{i=1}^n h(|\text{round}(b_i^*) - N_{ABO_i}|), \quad (4)$$

где  $\text{round}(x)$  – функция округления до ближайшего целого числа,  $h(x)$  – функция Хевисайда. Для более эффективного анализа рассчитывается еще один критерий: количество существенных ошибок модели, когда рассчитанное количество включенных вентиляторов отличается от количества, соответствующего реальной ситуации, более чем на один:

$$ErrS = \sum_{i=1}^n h\left(\left|\text{round}(b_i^*) - N_{ABO_i}\right| - 1\right). \quad (5)$$

После анализа результатов предпринята попытка повысить точность модели путем введения квадратичной зависимости:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & F_i & P_i & \theta_{in_i} & \theta_{out_i} & T_{air_i} & F_i^2 & P_i^2 & \theta_{in_i}^2 & \theta_{out_i}^2 & T_{air_i}^2 & F_i P_i & \dots \\ F_i \theta_{in_i} & F_i \theta_{out_i} & F_i T_{air_i} & P_i \theta_{in_i} & P_i \theta_{out_i} & P_i T_{air_i} & \theta_{in_i} \theta_{out_i} & \theta_{in_i} T_{air_i} & \theta_{out_i} T_{air_i} \end{bmatrix}_{n \times 21}. \quad (6)$$

2. Аналитическая модель. При рассмотрении процесса охлаждения газа как процесса с распределенными параметрами температура на выходе АВО может быть описана уравнением [3]

$$\theta_{out} = \theta_{in} \cdot \exp[-\beta L/v] + T_{air} \cdot (1 - \exp[-\beta L/v]), \quad (7)$$

где  $L$  – длина трубок теплообменных аппаратов,  $v$  – скорость потока,  $\beta$  – коэффициент, зависящий от физических параметров газа и воздуха, конструктивных параметров теплообменника (диаметр трубки, тип оребрения и проч.), а также от количества включенных вентиляторов. Исходя из (7) для каждой  $i$ -той ситуации может быть рассчитано значение коэффициента  $\beta_i$ :

$$\beta_i = -\frac{L}{v_i} \ln\left(\frac{\theta_{out_i} - T_{air_i}}{\theta_{in_i} - T_{air_i}}\right), \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где скорость потока для  $i$ -той ситуации рассчитывается через объемный расход газа и давление:

$$v_i = \frac{F_i P_{ny}}{\theta_{ny}} \frac{(\theta_{in_i} + 273,15)}{P_i} \frac{1}{S_{mp} N_{mp} N_{yOG}}, \quad (9)$$

$P_{ny}$  – давление при нормальных условиях,  $1,033227237 \text{ кг/см}^2$ ,  $\theta_{ny}$  – температура газа при нормальных условиях,  $293,15 \text{ К}$ ,  $S_{mp}$  – площадь сечения трубки аппарата воздушного охлаждения (АВО) газа,  $N_{mp}$  – количество трубок в аппарате АВО,  $N_{yOG}$  – количество аппаратов в установке охлаждения газа.

По результатам активного эксперимента известно, что зависимость коэффициента  $\beta$  для всей установки охлаждения газа от числа включенных вентиляторов  $N_{ABO}$  при прочих неизменных параметрах близка к линейной:

$$\beta(N_{ABO}) = h_0 + h_1 N_{ABO}. \quad (10)$$

Выражая  $N_{ABO}$  из (10) через значение  $\beta$ , рассчитанное по выражению (8), получим

$$N_{ABO_i} = \frac{1}{h_1} \left( -\frac{L}{v_i} \ln\left(\frac{\theta_{out_i} - T_{air_i}}{\theta_{in_i} - T_{air_i}}\right) - h_0 \right). \quad (11)$$

Значения коэффициентов  $h_0, h_1$  можно получить с помощью регрессионного анализа (1), составив матрицы

$$\mathbf{k}_4 = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & N_{ABO_i} \end{bmatrix}_{n \times 2}, \mathbf{B}_4 = [\beta_i]_{n \times 1}. \quad (12)$$

Коэффициент  $\beta$  зависит не только от количества включенных вентиляторов, но и физических параметров газа и воздуха, которые тоже могут быть включены в регрессионную модель (12) в качестве параметров за счет введения квадратичной зависимости коэффициентов регрессии от температур:

$$h_j(\theta_{in}, \theta_{out}, T_{air}) = h_{j0} + h_{j1}\theta_{in} + h_{j2}\theta_{out} + h_{j3}T_{air} + h_{j4}\theta_{in}^2 + h_{j5}\theta_{out}^2 + h_{j6}T_{air}^2 + \\ + h_{j7}\theta_{in}\theta_{out} + h_{j8}\theta_{in}T_{air} + h_{j9}\theta_{out}T_{air}, \quad j = \overline{0, 1}. \quad (13)$$

3. Метод ближайшего соседа. Данные о функционировании установки в течение длительного времени могут использоваться для создания прецедентной модели с помощью метода ближайшего соседа [4–6]. Для предъявленной ситуации модель находит ближайшую аналогичную ситуацию, существующую в эталонной выборке, и в качестве выхода возвращает число включенных вентиляторов в найденном аналоге. Ближайшая ситуация определяется по расстоянию в пространстве входных параметров модели.

В качестве эталонной выборки используются данные из множества  $M = \{(\mathbf{x}_i, N_{ABO_i})\}$ , где  $\mathbf{x}_i = [F_i \ P_i \ \theta_{in_i} \ \theta_{out_i} \ T_{air_i}]^T$  – вектор входных параметров соответствующий  $i$ -той ситуации.

Оценка точности прецедентной модели выполнялась по эталонной выборке с помощью следующего алгоритма. Из эталонной выборки  $M$  извлекалась пара  $(\mathbf{x}_j, N_{ABO_j})$  и предъявлялась на вход прецедентной модели, которая в качестве эталонной выборки использовала выборку  $M^*$ :

$$M^* = M \setminus \{(\mathbf{x}_i, N_{ABO_i}) : \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_j\}. \quad (14)$$

Ближайший сосед определялся по минимальному расстоянию между предъявленным вектором  $\mathbf{u}$  и вектором эталонной выборки  $\mathbf{x}$ , которое рассчитывалось как

$$\rho(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^T \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{x})}. \quad (15)$$

Повышение точности модели, реализованной с помощью метода ближайшего соседа, выполнено с помощью подбора коэффициентов, определяющих вклад каждого входного параметра в расчет расстояния:

$$\rho_w(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sqrt{\sum_j w_j \cdot (u_j - x_j)^2}. \quad (16)$$

В табл. 1 приведены результаты оценки погрешности моделей на множестве отобранных ситуаций общим количеством 21099.

Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают, что наибольшей точностью обладают модели, построенные на базе метода ближайшего соседа. Регрессионная и аналитическая модели обладают практически одинаковой точностью.

Таблица 1

## Оценка погрешности моделей, построенных на всех элементах множества ситуаций

№	Название модели	Количество ошибок			
		всего		существенных	
		ед.	%	ед.	%
1.1	Линейная регрессия, (2)	15584	73,86	9413	44,61
1.2	Нелинейная регрессия, (6)	13668	64,78	6416	30,41
2.1	Аналитическая модель, (10)	15814	74,95	12325	58,42
2.2	Аналитическая модель с температурной зависимостью коэффициентов, (13)	14650	69,43	8663	41,06
3.1	Метод ближайшего соседа	4418	20,94	1324	6,28
3.2	Метод ближайшего соседа с весовыми коэффициентами, (16)	4379	20,75	1308	6,20

Анализ исходных данных показал, что в ряде ситуаций УОГ выходит на ограничение по мощности, – например, при высокой температуре воздуха все включенные вентиляторы не обеспечивают достижения заданной температуры газа на выходе установки. Аналогичные ситуации возникают в зимний период, когда даже при всех выключенных вентиляторах температура на выходе УОГ опускается ниже заданной. Исключение таких ситуаций из расчета модели может улучшить точность модели, поскольку ограничение по мощности как нелинейная составляющая может быть легко учтено после расчета линейной модели. После исключения 2558 ситуаций были проведены повторные расчеты коэффициентов моделей на эталонной выборке из 18541 ситуаций. Точность моделей, как и в первый раз, оценивалась на всех элементах множества (табл. 2).

Таблица 2

## Оценка погрешности моделей, построенных по эталонной выборке

№	Название модели	Количество ошибок			
		всего		существенных	
		ед.	%	ед.	%
1.1	Линейная регрессия, (2)	15445	73,20	8840	41,90
1.2	Нелинейная регрессия, (6)	12228	57,96	5184	24,57
2.1	Аналитическая модель, (10)	14797	70,13	8699	41,23
2.2	Аналитическая модель с температурной зависимостью коэффициентов, (13)	14776	70,03	8529	40,42
3.1	Метод ближайшего соседа	1760	8,34	851	4,03
3.2	Метод ближайшего соседа с весовыми коэффициентами, (16)	1724	8,17	840	3,98

В результате погрешность регрессионной и аналитической моделей практически не изменилась, а погрешность модели, построенной по методу ближайшего соседа, снизилась более чем в два раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев Р.А. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз. – М.: Недра, 1987. – 271 с.
2. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия = Applied Regression Analysis. – 3-е изд. – М.: Диалектика, 2007. – С. 912.
3. Алимов С.В., Данилушкин И.А., Мосин В.Н. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – Вып. 2(26). – С. 178–186.
4. Распознавание. Метод ближайших соседей [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод\\_ближайшего\\_соседа](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод_ближайшего_соседа), свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
5. Данилушкин И.А., Данилушкин А.И., Шабанов К.Ю. Создание экспертной системы управления установкой охлаждения газа по данным технологических архивов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): материалы Девятой междунар. конф., 3–5 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2: Секции 5–13. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 423–426.
6. Данилушкин И.А., Данилушкин А.И., Шабанов К.Ю. Экспертная система управления установкой охлаждения газа // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): труды Девятой междунар. конф., 03–05 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 274–279.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2017 г.*

## MODELING OF FUNCTIONING STEADY-STATE MODES OF GAS COOLING SYSTEM

***I.A. Danilushkin, A.A. Zhelandinova, S.A. Kolpaschikov, V.K. Tyan***

Samara State Technical University  
244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The article is devoted to the development and comparison of static models of the gas cooling system. As initial data, instantaneous values of plant operation technological parameters were used, fixed for six years with a two-hour period. In this article, we made preliminary selection of data corresponding to the operating mode. We also show implementation results of models based on: regression analysis, solving of heat transfer equation, the nearest neighbor algorithm. The error of the obtained models is estimated.*

***Keywords:*** gas cooling system, static mode, regression analysis, analytical model, case model, nearest neighbor algorithm

---

*Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Alexandra A. Zhelandinova, Postgraduate Student.  
Sergey A. Kolpaschikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Vladimir K. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК65.011.56

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И ПОТЕНЦИАЛА ТОПЛИВА В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

**Ю.С. Труфанов**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: trufanov@list.ru

*Предложен подход для определения количества топлива в топливных резервуарах на основании первичных производственных данных. Использована математическая модель количества топлива в резервуарах. Использование модели применимо для учета количества топлива в статических состояниях, таких как операции снятия натуральных остатков. При многократных оперативных вычислениях массы топлива с небольшим интервалом времени (при ее фактическом изменении, например, вследствие закачки или откачки резервуара) полученные значения массы могут быть интерпретированы как расход массы топлива в трубопроводе, т. е. как альтернатива показаниям расходомера. Метод представляет интерес для теплоэнергетических предприятий, так как позволяет имитировать расход топлива в тоннах (масса) и в тоннах условного топлива (ТУТ) (энергетическая ценность).*

**Ключевые слова:** топливный резервуар, методика измерения количества нефтепродукта, виртуальный расходомер в ТУТ.

### Введение

Тепловая энергетика составляет около 68 % от общих энергогенерирующих мощностей России. Значительно меньшее количество энергии производят атомные и гидроэлектростанции (рис. 1).

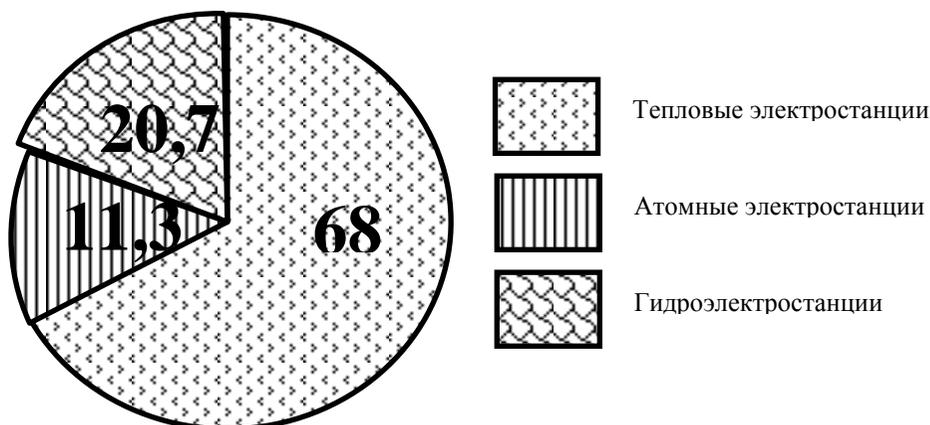


Рис. 1. Диаграмма распределения энергогенерирующих мощностей России

Основными видами топлива на объектах теплоэнергетики являются природный газ (порядка 70 %) и уголь (около 27 %). В качестве резервного топлива применяется мазут. В европейской части России используется преимущественно

Юрий Сергеевич Труфанов, аспирант.

газ и мазут (около 80 %), в восточной части страны – уголь (около 80 %) [1].

Для повышения эффективности воспламенения и стабилизации процесса горения углей на тепловых электростанциях используют также высококалорийное жидкое топливо – мазут (в объеме 10–20 % от расхода угля). Соответственно ежегодно на пылеугольных ТЭС России расходуется более 5 млн тонн мазута для растопки котлов, подсветки факела и стабилизации выхода жидкого шлака [2].

На большинстве российских ТЭС для хранения мазута используются резервуарные парки с вертикальными резервуарами. Они предназначены для оперативного хранения мазута с целью обеспечения его аварийного запаса.

Задача определения количества мазута важна для более точного планирования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также обеспечения безостановочного сгорания целевого топлива.

### **Математическая модель, решение задачи определения количества топлива в статике**

Масса ( $m_r$ ) топлива в каждом из резервуаров топливного парка (ТП) зависит от объема ( $V_r$ ), плотности ( $\rho_r$ ) и температуры ( $T_r$ ) (порядок отбора проб приведен в [3], а метод определения плотности продукта (топлива) – в [4], [5]) и представляет собой функцию  $m_r = F[V_r(T_r), \rho_r]$ , где  $m_r = 1 \div n$ ,  $n$  – количество резервуаров в ТП.

В рекомендации государственной системы обеспечения единства измерений [6] содержится методика косвенного определения массы топлива, расчет осуществляется в соответствии с формулой

$$m = V \cdot \rho = V_N \cdot [1 + (2\alpha_{СТ} + \alpha_S) \cdot (T_V - 20)] \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $V$  – фактический объем топлива при температуре его измерения в топливном резервуаре, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность топлива при температуре его измерения в топливном резервуаре, кг/м<sup>3</sup>;  $V_N$  – объем топлива в резервуаре, м<sup>3</sup>, вычисляют по формуле  $V_N = V_o - V_v$ ;  $V_o$  – общий объем топлива и подтоварной воды в топливном резервуаре, м<sup>3</sup> (определяется по градуировочной таблице резервуара, методика поверки описана в [7]);  $V_v$  – объем подтоварной воды, м<sup>3</sup> (определяется по градуировочной таблице резервуара);  $\alpha_{СТ}$  – температурный коэффициент линейного расширения материала стенки резервуара;  $\alpha_S$  – температурный коэффициент линейного расширения материала рулетки;  $T_V$  – температура измерения объема, °С.

Система уравнений, описывающая количество топлива в топливных резервуарах в целом, выглядит так:

$$\begin{cases} m_1 = F[V_1(T_1), \rho_1]; \\ m_2 = F[V_2(T_2), \rho_2]; \\ \dots \\ m_n = F[V_n(T_n), \rho_n] \end{cases} \quad (2)$$

Общая масса топлива в топливных резервуарах:

$$M = \sum_{r=1}^n m_r. \quad (3)$$

Данное решение статической задачи может быть использовано для определения количества топлива в топливных резервуарах (натурных остатков) в тоннах (в [8] подробно описан подход к определению количества нефтепродукта в резервуарном парке в натуральных единицах). Оно же может быть использовано для пересчета жидкого топлива в тоннах условного топлива (ТУТ):

$$M_{\text{ТУТ}} = \frac{Q_N}{Q_{\text{ТУТ}}} \cdot M, \quad (4)$$

где  $Q_N$  – низшая удельная теплота сгорания (теплотворная способность) мазута [МДж/кг];

$Q_{\text{ТУТ}}$  – постоянная величина (теплота сгорания условного топлива) [29,3 МДж/кг];

$M$  – масса топлива в натуральных единицах.

Благодаря указанному пересчету можно оценить потенциал топлива в резервуарах.

#### Имитация показаний расходомера в ТУТ, решение задачи определения количества топлива «в динамике»

Статическая модель определения количества топлива в топливном парке позволяет получить важные, но ограниченные результаты. Значительно больший эффект дает динамический подход при определении количества топлива в резервуарах. Подход заключается в том, что, производя расчет массы в резервуаре достаточно часто, например в темпе с поступлением данных в SCADA, можно рассматривать изменение массы в резервуаре по времени ( $t$ ) как расход нефтепродукта в трубопроводе, связанном с резервуаром.

$$\Delta m_r(t) = F[t, V_r(T_r), \rho_r] - F[t_{i-1}, V_r(T_r), \rho_r]. \quad (5)$$

Знак  $\Delta m_r(t)$  показывает вид операции: “–” откачка или “+” закачка.

Принципиально изменение состояния резервуара (изменение количества топлива в резервуаре за интервал времени) показано на рис. 2.

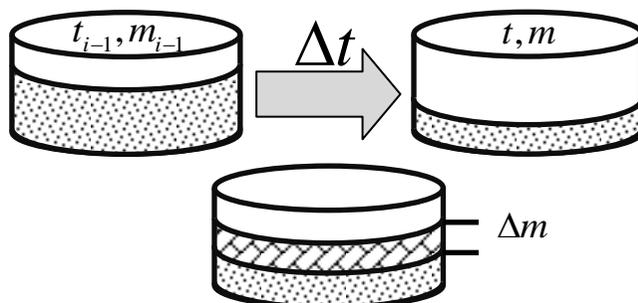


Рис. 2. Изменение количества топлива в резервуаре за интервал времени

Пересчитывая изменение массы топлива в ТУТ за известный интервал времени, можно получить величину, подобную мгновенному расходу в условном топливе:

$$\Delta M_{UT} = \frac{Q_N}{Q_{UT}} \cdot \Delta m_r(t). \quad (6)$$

### Заклучение

Оперативное определение количества топлива в массовом эквиваленте условного топлива в каждом резервуаре является важной операцией для планирования поставок топлива на предприятии теплоэнергетики.

Предложенный подход позволяет получить дополнительные данные по расходу топлива в условных величинах, что интересно при оперативной оценке эффективности работы котлов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроэнергетика России: [Электронный ресурс] // Техническая инспекция ЕЭС. URL: <http://www.ti-ees.ru/ees/>. (Дата обращения: 01.09.2015).
2. Запрудский С.Г., Рогов Е.В. Технические предложения и разработки по безмазутной растопке и подсветке факела топочных камер котлов // Проспект Свободный-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.). Теплоэнергетика. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – С. 22–30.
3. ГОСТ 2517-85. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб.
4. ГОСТ Р 51069-97. Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром.
5. ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности.
6. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Масса и объем нефтепродуктов. Методика измерений в вертикальных резервуарах. МИ 3252-2009.
7. ГОСТ 8.570. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки.
8. Труфанов Ю.С. Математическая модель количества нефтепродукта в резервуарном парке // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2015. – № 1. – С. 73–75.

*Статья поступила в редакцию 29 декабря 2016 г.*

## DYNAMIC DETERMINATION OF QUANTITY AND CAPACITY IN THE FUEL TANKS

**Y.S. Trufanov**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*An approach is proposed for determining the amount of fuel in fuel tanks based on primary production data. A mathematical model of the amount of fuel in tanks is used. The use of the model is applicable for calculating the amount of fuel in static states, such as operations to remove full-scale residues. With multiple operational calculations of the mass of fuel with a small time interval (if it is actually changed, for example, as a result of filling or evacuation out the tank), the resulting mass values can be interpreted as the fuel mass flow in the pipeline, i.e. As an alternative to the meter reading. The method is of interest for heat-and-power engineering plants, since it allows simulating fuel consumption in tons (mass) and in tons of equivalent fuel (energy value).*

**Keywords:** fuel tank, method of measuring the amount of oil, virtual flowmeter in standard fuel.

УДК 620.179.1

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Е.Е. Ярославкина<sup>1</sup>, А.Ю. Ярославкин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский национально-исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

*Выполнена попытка идентификации дефекта в твердом теле с помощью методов неразрушающего контроля (поляризационно-оптических методов). Проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния натуральных объектов с использованием плоских и пространственных моделей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, содержащих внутри полости (дефекты) различного объема. Выполнено моделирование дефекта внутри твердого тела кубической формы под действием одноосного нагружения в многофункциональном комплексе Simula Abaqus. Рассмотрены различные случаи расположения дефектов в твердом теле. Приведены результаты численных расчетов, выполненных в программном комплексе Simula Abaqus.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, интерференционно-оптический метод, инвариантный интеграл, неразрушающий контроль.

### **Введение**

В настоящее время продолжается интенсивная разработка методов контроля материалов и элементов конструкций с возможностью определения дефектов, включений и трещин внутри конструкции. Определение полей деформаций и напряжений в деформируемом твердом теле под действием статических и динамических нагрузок является актуальной проблемой современной механики деформируемого твердого тела и смежных областей (материаловедения, физики твердого тела). В последнее время особый интерес представляет использование поляризационно-оптических методов для фиксации зон концентрации напряжений и определение их характеристик.

### **Экспериментальная часть**

В данной статье произведено сопоставление конечно-элементных расчетов идентификации дефекта в упругом теле с экспериментальными результатами, полученными с помощью поляризационно-оптических методов. Для решения поставленной задачи было создано нескольких видов образцов посредством прототипирования (RP-rapidprototyping), содержащих внутри полости (дефекты) различной формы. Изготовление разнообразных деталей с помощью 3D-принтера открывает возможность для свободного моделирования разнообразных элементов конструкций. Для проведения экспериментальных

---

*Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Александр Юрьевич Ярославкин, магистр.*

исследований были изготовлены образцы из PLA-пластика посредством прототипирования (рис. 1).

Был проведен конечно-элементный расчет и компьютерное моделирование в многофункциональном комплексе Simulia Abaqus образцов с такой же геометрией, что и в натурном эксперименте, с целью верификации результатов обработки всей совокупности экспериментальной информации (рис. 2).

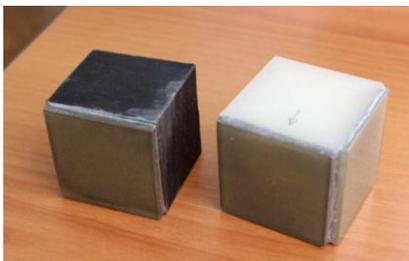


Рис. 1. Образцы для выполнения эксперимента

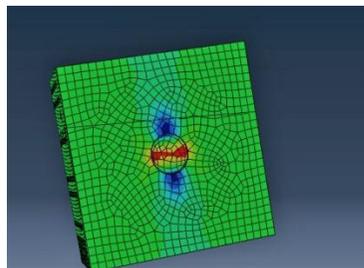


Рис. 2. Моделирование в МКЭ с автоматическим разбиением сетки

Дефекты внутри твердого упругого тела могут иметь различную форму, поэтому за возможный дефект была принята модель, аппроксимирующая сфероидальную полость. В процессе моделирования были рассмотрены различные методики применения разбиения элементов.

На первом этапе было произведено разбиение всей области объекта в автоматическом режиме (см. рис. 2). На втором этапе было выполнено локальное разбиение сферической области (области дефекта). Для разбиения данной области кроме треугольных и квадратных элементов использовались шестигранные призматические элементы (рис. 3).

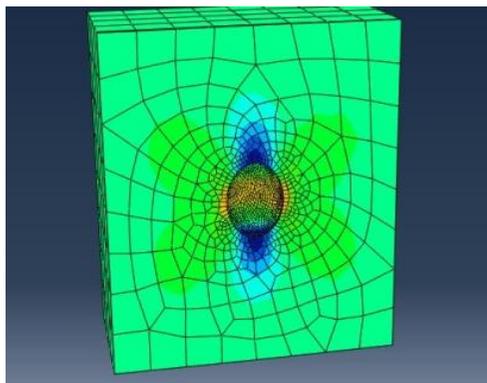


Рис. 3. Локальное разбиение в области дефекта

В ходе проведения расчетов в МКЭ было вычислено аналитическое выражение для коэффициента концентрации напряжения:

$$k = \frac{-3(9-5\nu)}{2(7-5\nu)} = 2.045.$$

С помощью МКЭ Simula Abaqus было вычислено численное значение коэффициента интенсивности напряжения:

- при локальной сетке  $k = 1,937$ ;
- при грубой автоматической сетке  $k = 1,553$ .

Анализ полученных значений свидетельствует о том, что измельченное локальное разбиение полости внутри расчетной модели позволяет достичь лучшего результата коэффициента концентрации напряжения.

В результате проведения анализа методов и средств неразрушающего оптического контроля был выбран метод фотоупругих покрытий. Определение координат и объема дефекта проводилось с помощью функционала взаимности, зависящего от двух упругих полей: поля в теле с дефектом и регулярно упругого поля в теле без дефекта [1].

В результате эксперимента получены картины изохром, по которым можно наблюдать образование дефектов. На рис. 4 представлены картины изохром, полученные на образцах плоской формы.

Цифровая обработка интерференционных картин [1] проводилась в пакете Maple. Был проведен численный расчет на основе модели идентификации дефектов в линейно-упругих твердых телах. Для идентификации дефекта использовался метод, основанный на инвариантных интегралах и функционале взаимности.

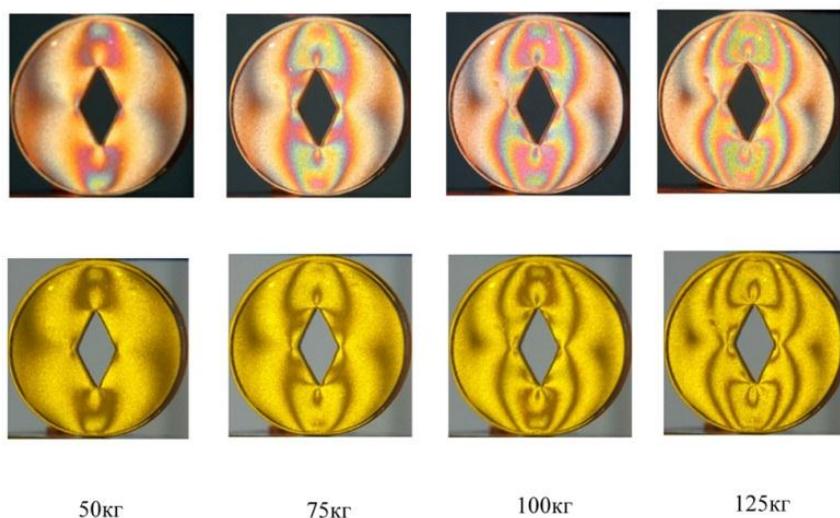


Рис. 4. Картины интерференционных полос:  
 в верхнем ряду – образцы, изготовленные посредством прототипирования из пластика;  
 в нижнем ряду – образцы, изготовленные механическим способом из оргстекла

Основная идея данного метода заключается в том, что по данным о перемещениях и усилиях на внешней границе тела значения функционала взаимности (1) могут быть вычислены для любого заданного регулярного упругого поля [2]:

$$RG^{(f)}(r) = \int_S \left( t_i^{(f)}(X)u_i^{(r)} - t_i^{(r)}(X)u_i^{(f)}(X) \right) dS.$$

Значения функционала взаимности определяются параметрами дефекта. В экспериментальных исследованиях интерференционно-оптических методов измерений механики твердого тела координаты и размер сферической полости внутри образца (2) были вычислены из свойств функционала взаимности, зависящего от двух упругих полей: поля в теле с дефектом и регулярного упругого поля в теле без дефекта [3]:

$$a^3 = \frac{-\mu_M(4-5\nu_M)(1+\nu_M)^2 M_{\text{int}}^{(3)}(C_3)}{3\pi(1-\nu_M)(5\nu_M^2 - \nu_M + 3)\sigma^2}.$$

### Выводы

Проведение эксперимента с помощью поляризационно-оптического метода исследований напряжений (фотоупругость) позволило найти поля деформаций и напряжений с применением объемных прозрачных (оптически чувствительных) моделей. Преимуществом метода является возможность получать поля напряжений по сечениям и внутри объема модели и вести измерения в зонах концентрации.

Полученный расчет для дефектов в виде сферических полостей показывает, что экспериментальные исследования дают хорошие результаты с малой погрешностью в случае, когда дефект находится достаточно близко к границе и когда расположен по центру. Потенциальные возможности применения результатов настоящего исследования для решения прикладных задач очень широки, ибо экспериментальные исследования полей напряжений и смещений в твердых телах неразрушающим методом имеют непосредственную цель – моделирование и контроль деталей различного промышленного назначения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Разумовский И.А.* Интерференционно-оптические методы механики деформированного твердого тела: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
2. *Шушпанников П.С.* Метод идентификации дефектов в линейно упругих телах по данным статических испытаний: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук / Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. – М., 2012.
3. *Шушпанников П.С.* Применение функционала взаимности для решения задачи идентификации эллипсоидального дефекта в упругом теле // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXVI Гагаринские чтения, 6 апреля 2010 г., Москва. – М.: МАТИ, 2010. – Т. 1.

*Статья поступила в редакцию 4 июня 2017 г.*

## USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR PILOT STUDIES OF METHODS OF NONDESTRUCTIVE CONTROL

*E.E. Yaroslavkina*<sup>1</sup>, *A.U. Yaroslavkin*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> Samara University  
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

*The attempt of identification of defect in a solid body by means of methods of nondestructive control (polarizing and optical methods) is executed. Pilot studies of the intense deformed condition of natural objects with use of the flat and spatial models made by means of the additive technologies containing (defects) of various volume in a cavity are conducted. Modeling of defect in a solid body of a cubic form under the influence of monoaxial loading in the multipurpose Simula Abaqus complex is executed. Various cases of an arrangement of defects in a solid body are considered. Results of the numerical calculations executed in the program Simula Abaqus complex are given.*

**Keywords:** *additive technology, interferential and optical methods, invariant integral, nondestructive check.*

---

*Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Aleksander U. Yaroslavkin, Graduate Student.*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

**Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

**<http://vestnik-teh.samgtu.ru>**

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала