

DOI: 10.18721/JEST.240104  
УДК 620.9

*А.С. Хисматуллин<sup>1</sup>, М.Г. Баширов<sup>2</sup>, Е.Г. Солдатова<sup>2</sup>, Е.Ю. Мавлекаев<sup>2</sup>*

1 – Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

2 – Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Статья посвящена повышению эффективности систем охлаждения силовых масляных трансформаторов при значительных длительных и кратковременных перегрузках, что позволяет увеличить их ресурс, повысить экономичность и безопасность эксплуатации. На базе изучения статистических данных установлено, что одна из основных причин отказа трансформаторов – неэффективность систем масляного охлаждения в летний период эксплуатации и при значительных перегрузках, как длительных, так и кратковременных. Для повышения эффективности системы охлаждения силовых масляных трансформаторов предлагается барботирование охлаждающего масла циркулирующим элегазом и последующее охлаждение элегаза термоэлектрическим холодильником. Система циркуляции и охлаждения элегаза включается автоматически при значительных перегрузках, длительных и кратковременных. Рассмотрены конструкция и работа предлагаемой системы охлаждения масляных трансформаторов. Проведена серия лабораторных экспериментов охлаждения трансформаторного масла в баке силового трансформатора без компрессора и с наличием компрессора. Приведены графики зависимостей температуры от времени при естественном охлаждении и при использовании барботирования. Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи трансформаторного масла на различных расстояниях от нагревательного элемента. Рассмотрена математическая задача распределения теплового потока в прямоугольном параллелепипеде, приведено решение уравнения теплопроводности в баке силового трансформатора, который представляет собой прямоугольный параллелепипед.

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА; ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ; КОНТРОЛЬ; РЕМОНТ; ЭЛЕГАЗ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ; БАРБОТИРОВАНИЕ.

*Ссылка при цитировании:*

А.С. Хисматуллин, М.Г. Баширов, Е.Г. Солдатова, Е.Ю. Мавлекаев. Повышение эффективности охлаждения маслонаполненных трансформаторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 38–49. DOI: 10.18721/JEST.240104.

*A.S. Khismatullin<sup>1</sup>, M.G. Bashirov<sup>2</sup>, E.G. Soldatova<sup>2</sup>, E.Yu. Mavlekaev<sup>2</sup>*

1 – Ufa State petroleum technological university, Ufa, Russia

2 – Ufa State petroleum technological university Salavat branch, Salavat, Russia

## **INCREASING THE EFFICIENCY OF COOLING IN OIL TRANSFORMERS**

The article is dedicated to the currently important problem of increasing the efficiency of cooling systems of oil transformers with considerable long and short overloads. Increasing the efficiency of cooling in oil transformers makes it possible to increase their engine life, improve efficiency and safety of operation. Statistical data are given on the causes of failure of the transformers of differ-

ent voltage classes and with different operating times. Based on the study of statistical data, it is established that inefficiency of oil cooling systems during the summer period of operation and with considerable short overloads is one of the main causes of transformer failure. To increase the efficiency of cooling systems of oil transformers, we propose agitation of cooling oil with circulating sulfur hexafluoride and subsequent cooling of sulfur hexafluoride with a thermoelectric cooler. The system of circulation and cooling of sulfur hexafluoride switches on automatically with considerable long and short overloads. We have considered the design and operation of the proposed cooling system for oil transformers. A series of laboratory experiments was carried out for cooling transformer oil in a power transformer tank with and without a compressor. The temperature versus time curves have been plotted for natural cooling and for the case when agitation is used. We have experimentally determined the coefficients of thermal diffusivity and heat transfer of transformer oil at various distances from the heating element. We have considered the mathematical problem of the distribution of the heat flux in a rectangular parallelepiped and obtained the solution of the heat conduction equation in a tank of a power transformer shaped as a rectangular parallelepiped. The construction of a laboratory installation is described in detail. The brands of thermocouples used, the brand of the compressor and the analog-digital converter are given.

TECHNICAL POSITION TRANSFORMER; ELECTRIC POWER SUPPLY; SUPERVISION; RECONDITION; SULFUR HEXAFLUORIDE; EFFICIENCY; AGITATION.

*Citation:*

A.S. Khismatullin, M.G. Bashirov, E.G. Soldatova, E.Yu. Mavlekaev. Increasing the efficiency of cooling in oil transformers, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 38–49, DOI: 10.18721/JEST.240104.

## Введение

В трансформаторах большой мощности выделяется большое количество теплоты, для отвода которой используются специальные масляно-воздушные охладители, обдуваемые воздухом с помощью вентилятора и оснащенные насосами для принудительной циркуляции масла. Принудительная циркуляция масла позволяет получить более равномерное распределение температуры по высоте бака и повышает эффективность охлаждения обмоток и магнитопровода трансформатора. В случае отключения системы охлаждения трансформаторы могут оставаться включенными в сеть очень непродолжительное время, так как теплоотдающей поверхности бака недостаточно даже для отвода энергии потерь холостого хода.

Срок естественного износа силовых трансформаторов марок ТМЗ, ТМ, ТАМ, работающих в номинальном режиме, составляет примерно 30 лет.

Поскольку приобретение новых трансформаторов высокочрезмерно, то энергослужбы проводят дополнительные мероприятия и увеличивают срок их службы. При этом повышается риск возникновения

аварийных ситуации. Как видно из рис. 1, значительное количество отказов силовых трансформаторов происходит из-за неудовлетворительной эксплуатации (более 50 % всех отказов) [1–14].

К основным эксплуатационным причинам, вызывающим повреждение (отказы) трансформаторов, следует отнести перегрев активной части из-за неэффективности системы масляного охлаждения в летний период эксплуатации и при кратковременных, но значительных перегрузках; существенным фактором также является ухудшение качества самого масла [12].

В случае аварийной перегрузки трансформатора происходит локальный перегрев масла у поверхности активной части трансформатора, что сопровождается интенсивным выделением газов из масла, вызывающим срабатывание газового реле и отключение трансформатора. Перегрев изоляции обмоток и магнитопровода сокращает ресурс трансформатора, а срабатывание газового реле часто приводит к необоснованным отключениям трансформатора при кратковременных перегрузках. Поэтому проблема повышения эффективности охлаждения масляных трансформаторов весьма актуальна.

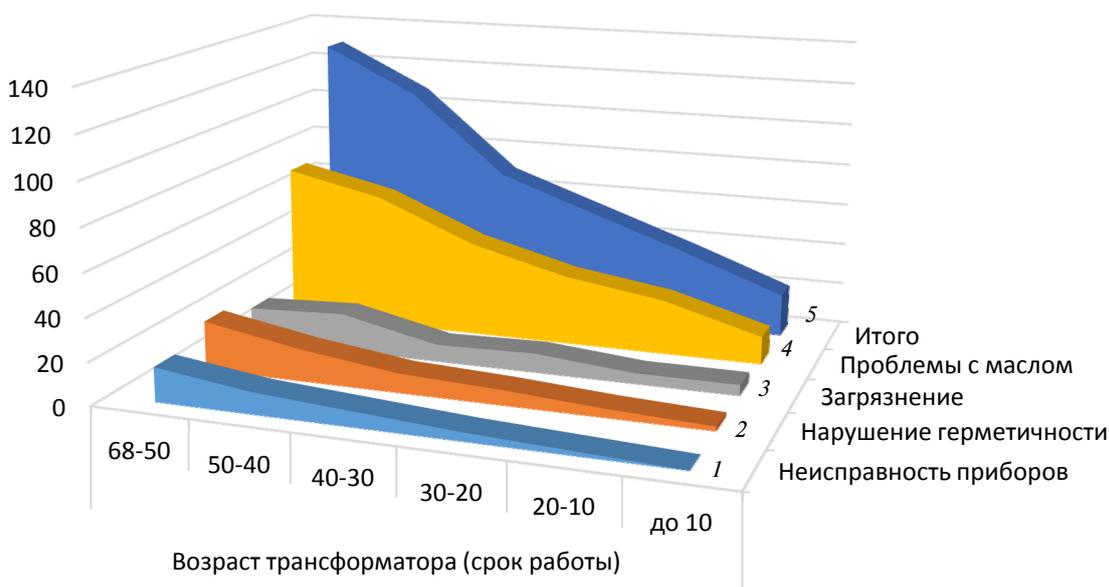


Рис. 1. Причины отказов масляных трансформаторов  
 1 – неисправность приборов; 2 – нарушение герметичности; 3 – загрязнение;  
 4 – проблемы с маслом; 5 – итого  
 Fig. 1. Reasons for oil transformer failures

Принцип элегазового барботирования трансформаторного масла лежит в основе полезной модели «Установка для охлаждения масляного трансформатора» [7]. Он заключается в том, что теплосъем с активной части трансформатора осуществляется трансформаторным маслом с циркулирующим в нем элегазом. Элегазовые пузырьки, всплывая, уносят с собой частички масла, которые последовательно отделяются от элегаза в баке-расширителе, фильтрах грубой и тонкой очистки. Далее элегаз охлаждается в холодильнике и попадает в специальную емкость, откуда подается компрессором в бак с минеральным маслом через равномерно расположенные в нижней части бака трубки с клапанами-распределителями.

Непосредственно в зоне расположения обмотки трансформатора установлен датчик температуры, выход которого подключен к входу блока управления. При нагревании активной части трансформатора (обмотки и магнитопровод) выше установленного значения блок управления выдает сигналы включения на управляющие входы компрессора и холодильника; при снижении температуры активной части транс-

форматора ниже заданного значения блок управления подает сигналы отключения на управляющие входы компрессора и холодильника [8]. При отсутствии перегрузок, а значит, перегрева трансформатор работает в обычном режиме, т.е. охлаждение активной части осуществляется циркулирующим трансформаторным маслом. Применение холодильника позволяет повысить эффективность охлаждения элегаза, а соответственно, – трансформаторного масла и активной части трансформатора. Холодильник представляет собой термоэлектрический модуль, работа которого основана на явлении термоэлектрической эмиссии. Термоэлектрический модуль содержит последовательно соединенные полупроводники *p*- и *n*-типа, образующие *p-n*-переходы между керамическими пластинами. В свою очередь каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла.

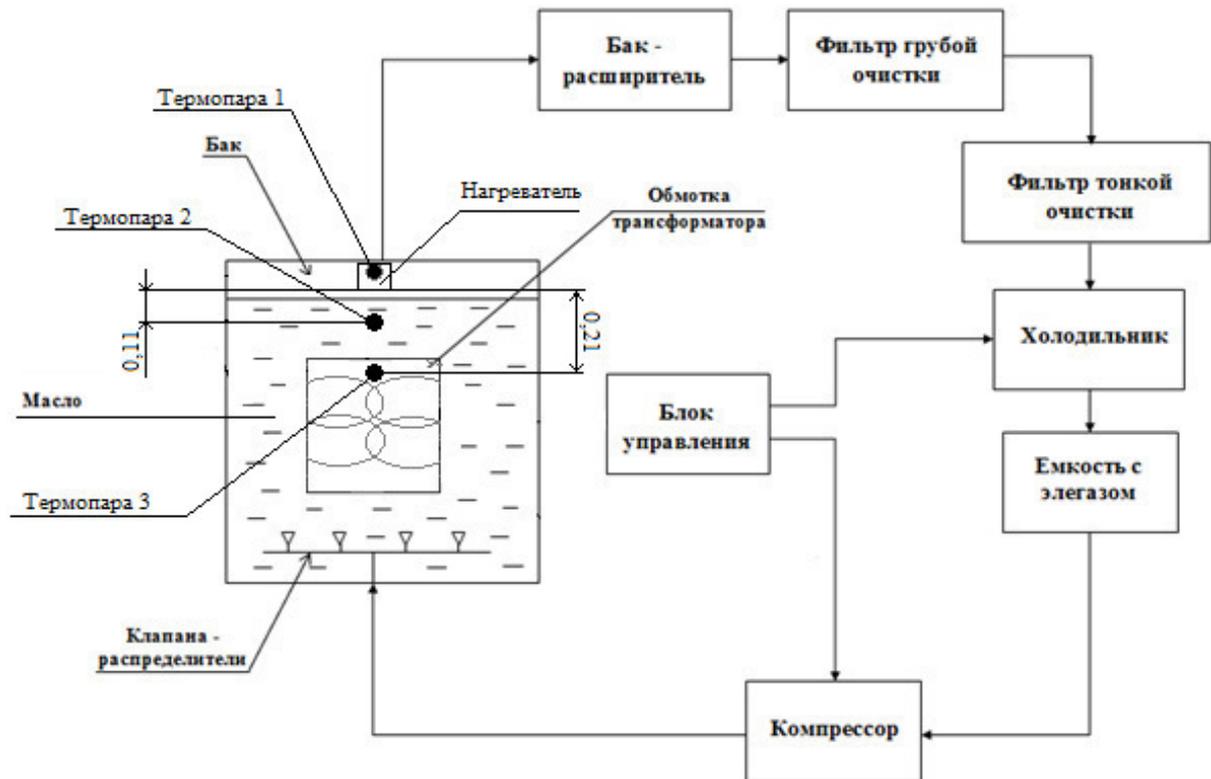


Рис. 2. Структурная схема установки для охлаждения масляного трансформатора  
Fig. 2. Block diagram of the unit for cooling oil transformer

Основным преимуществом термоэлектрического модуля является то, что он позволяет получить значительный температурный перепад – в несколько десятков градусов, т.е. обеспечить эффективное охлаждение элегаза, а это, в свою очередь, обеспечивает более эффективное охлаждение активной части трансформатора.\*

«Установка для охлаждения масляного трансформатора» [7] включает в себя последовательно соединенные трубками емкость, заполненную элегазом, компрессор, трубки с равномерно расположенными на них клапанами-распределителями, бак-расширитель, фильтры тонкой и грубой

очистки. Между выходом фильтра тонкой очистки и входом в емкость с элегазом включен холодильник; в зоне расположения обмотки трансформатора установлен датчик температуры, выход которого подключен к входу блока управления, а выходы блока управления подключены к управляющим входам компрессора и холодильника.

На рис. 2 изображена структурная схема установки для охлаждения масляного трансформатора.

Согласно ГОСТ 12.1.007–76 по степени воздействия на организм элегаз относится к 4 классу опасности, к которому принадлежат вещества малоопасные. При проведении экспериментальных исследований вместо элегаза был использован воздух, так как по технике безопасности в лабораторных условиях в помещениях элегаз применять запрещено. Его использование опасно для людей.

**Целью работы** было исследование эффективности способа охлаждения трансформатора, основанного на барботировании трансформаторного масла элегазом [1–9].

\* Патент РФ на полезную модель № 167206. Установка для охлаждения масляного трансформатора. Правообладатель ФГБОУ ВО УГНТУ / Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Переверзев А.И. Заявка № 2016124531. Приоритет полезной модели 20 июня 2016. Зарегистрировано в гос. реестре полезных моделей Российской Федерации 08.12.2016. Срок действия патента истекает 20.06.2026.

**Расчетная часть исследований**

Постановка задачи. Рассмотрим тепловой поток в прямоугольном параллелепипеде (рис. 3).

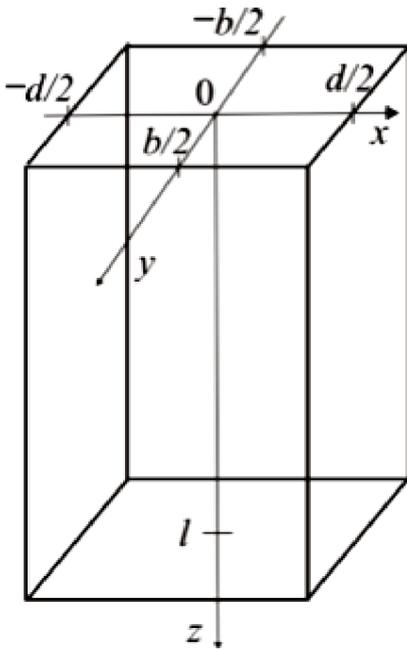


Рис. 3. Геометрия задачи  
Fig. 3. Geometry of the problem

В начальный момент масло находится внутри резервуара при температуре  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ , но со временем приобретает температуру нагревателя  $T_H = 50^\circ\text{C}$ . Рассмотрим прямоугольный параллелепипед, ограниченный по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ : соответственно  $0 < x < d/2$ ;  $0 < y < b/2$ ;  $0 < z < l$ ,  $t > 0$ . Решается уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

в области

$$0 < x < \frac{d}{2}, 0 < y < \frac{b}{2}, 0 < z < l, t > 0 \quad (1)$$

с начальным условием

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (2)$$

Здесь  $a = \lambda/c\rho$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теп-

лопроводности;  $T_0$  – температура окружающей среды. Теплообмен с окружающей средой на поверхности  $S$  описывается согласно закону Ньютона:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_S = \alpha (T|_S - T_0),$$

где  $S$  – поверхность стенки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи среды (масло – металл – воздух).

В эксперименте температура над нагревателем в течение 10 минут достигает установившегося значения. Поэтому при продолжительности эксперимента более 30 минут можно считать, что  $T_H = \text{const}$ . Температура окружающей среды тоже предполагается постоянной,  $T_0 = \text{const}$ , т.к. среднесуточное изменение температуры в течение года примерно  $10^\circ\text{C}$ , а время проведения экспериментов, кроме экспериментов без всплывающих пузырьков, меньше двух часов.

Обозначим  $h = \alpha/\lambda$ . Тогда граничные условия можно записать так:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d/2} + h \left( T|_{x=d/2} - T_0 \right) = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b/2} + h \left( T|_{y=b/2} - T_0 \right) = 0;$$

$$T|_{z=l} = T_0, \quad T|_{z=0} = T_H.$$

Решив задачу методом свертки, окончательно получим для расчетов

$$T = 16 \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_n b/2)}{\chi_n d + \sin(\chi_n d)} \times \frac{\cos(\chi_n x) \cos(\mu_n y)}{\mu_n b + \sin(\mu_n b)} \left\{ \frac{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_n^2} (1-z))}{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_n^2} l)} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) e^{-a(\chi_n^2 + \mu_n^2 + (\pi k/l)^2)t}}{((\chi_n^2 + \mu_n^2)l^2 + \pi^2 k^2)} \right\} \right] \times (T_H - T_0) + T_0,$$

где  $\chi_n$  и  $\mu_n$  – константы трансцендентного уравнения; уравнения для их определения записываются так:

$$-\chi_n \sin\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) + h \cos\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) = 0,$$

$$h \cos\left(\mu_n \frac{b}{2}\right) - \mu_n \sin\left(\mu_n \frac{b}{2}\right) = 0.$$

### Экспериментальная часть

Для исследования предложенного способа охлаждения масляных трансформаторов была разработана лабораторная установка (рис. 4). При проведении серии экспериментов трансформаторное масло подвергалось нагреву нагревательным элементом мощностью 450 Вт при начальной температуре масла 20 °С.

Для исследования топографии теплового поля в баке трансформатора на определенных расстояниях установлены термопары ТХК-0292 (L-типа), сигналы с которых поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя ADAM 4018 В

(фирма-изготовитель Advantech), сигналы с выхода которого поступают в компьютер 1 для последующей обработки и анализа. Сигнал верхней термопары 1 с помощью специальной программы управляет масляным компрессором 5 (фирма-изготовитель Abac Pole Position 241), подающим газ в керамические распределители, расположенные на дне резервуара. Компрессор автоматически включается при достижении верхними слоями масла температуры 55 °С и отключается при понижении температуры до 30 °С.

В случае, когда происходит охлаждение трансформаторного масла всплывающими пузырьками воздуха, расход воздуха составляет 1,3 л/мин. Масло нагревалось до температуры 70 °С; фиксировалось время остывания масла без барботирования элегазом. Температура масла снизилась до уровня комнатной температуры 25 °С за 100 минут. Во время остывания каждые 5 минут фиксировалось значение температуры. По этим полученным значениям был построен график естественного остывания масла (рис. 6).

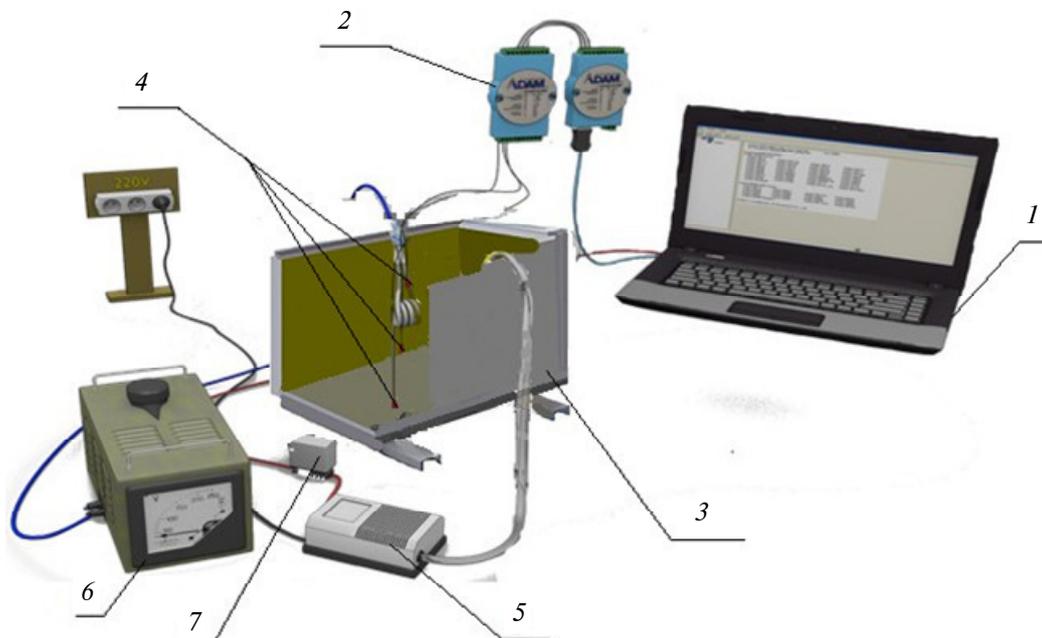


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – компьютер; 2 – аналогово-цифровой преобразователь; 3 – резервуар в виде бака от масляного трансформатора; 4 – термопары; 5 – микрокомпрессор; 6 – автотрансформатор; 7 – реле

Fig. 4. The scheme of the experimental setup:

1 – the computer; 2 – analog-to-digital converter; 3 – a tank in the form of a tank from an oil transformer; 4 – thermocouples; 5 – microcompressor; 6 – autotransformer; 7 – relay

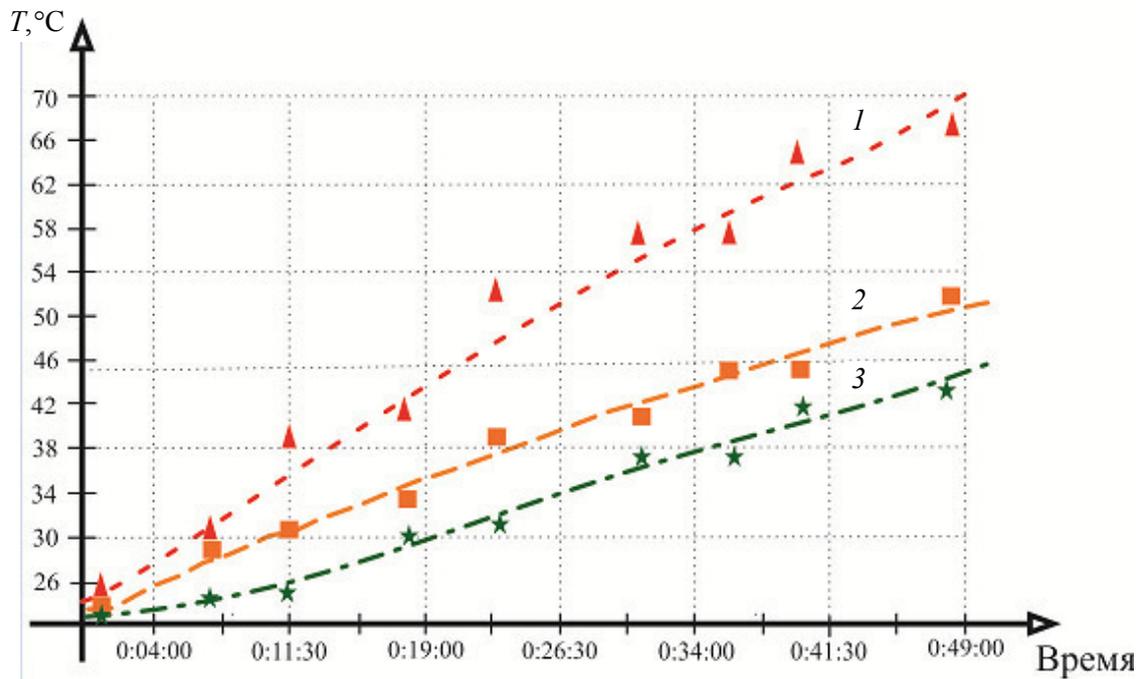


Рис. 5. Зависимости температур от времени при мощности нагревательного элемента 450 Вт:  
 1 (термопара 1) – температура рядом с нагревателем; 2 (термопара 2) – на расстоянии 0,11 м от нагревателя;  
 3 (термопара 2) – 0,21 м от нагревателя

Fig. 5. Temperature versus time at power heating element 450 W:

1 – temperature next to the heater; 2 – at a distance of 0.11 m from the heater; 3 – 0.21 m from the heater

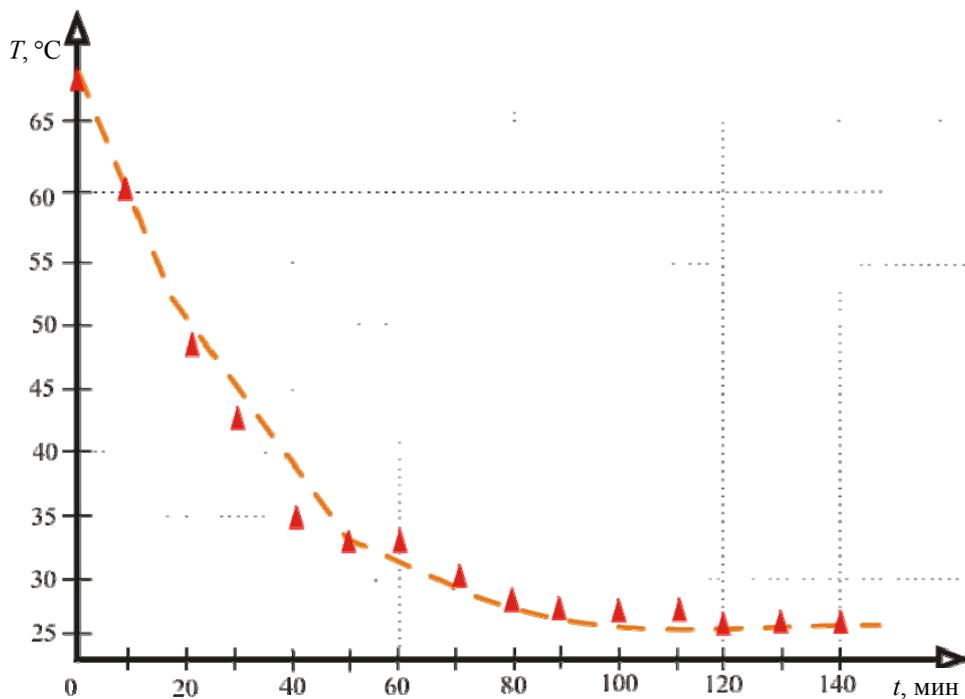


Рис. 6. График естественного охлаждения масла

Fig. 6. Schedule of natural cooling of oil

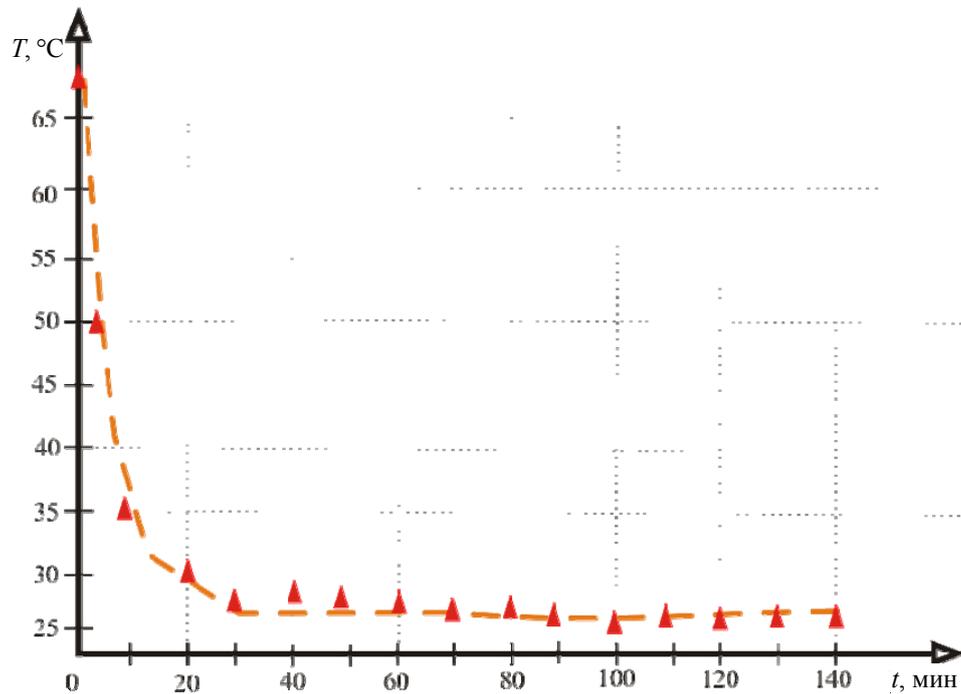


Рис. 7. График охлаждения масла при барботировании  
 Fig. 7. Oil cooling diagram for bubbling

При проведении второго эксперимента включен компрессор для барботирования масла пузырьками воздуха. После нагревания масла до температуры 70 °С был включен компрессор (рис. 7).

Данный эксперимент показал, что охлаждение масла с помощью пузырьков эффективнее, чем без них. Сравнивая графики рис. 6 и 7, видим, что у трансформаторного масла объемом 0,018 м<sup>3</sup> температура понижается с 70 °С до 25 °С за 30 минут при барботировании, в то время как без барботирования – за 100 мин.

Экспериментально определен параметр теплообмена: его значение на поверхности масла –  $h = 0,02 \pm 0,003 \text{ м}^{-1}$ , где  $h = \alpha / \lambda$  (здесь  $\lambda$  – эффективный коэффициент теп-

лопроводности среды в емкости;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи через среду «трансформаторное масло – металлический корпус трансформатора – воздух»). Данные приведены в таблице.

Полученные опытные данные свидетельствуют о работоспособности установки. Определен коэффициент молекулярной теплопроводности  $a$ , который составляет примерно  $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$

(здесь  $c$  – удельная теплоемкость трансформаторного масла;  $\rho$  – плотность трансформаторного масла). Указанные коэффициенты определяются с помощью программы Тепло.exe [4].

**Результаты экспериментов**

**Results of experiments**

Номер термопары и ее расположение	Коэффициент теплопроводности, м <sup>2</sup> /с	Коэффициент теплоотдачи, м <sup>-1</sup>
1 – рядом с нагревом	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,02
2 – на расстоянии 0,11 м	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,005
3 – на расстоянии 0,21 м	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,0045

Как видно из таблицы, коэффициент теплоотдачи уменьшается с глубиной из-за уменьшения градиента температуры.

Основываясь на результатах экспериментов, можно сказать, что полученные данные подтверждают эффективность охлаждения при использовании пузырьков. Недостаток воздушного барботирования в том, что воздух по своей природе имеет свойство проникать в молекулы трансформаторного масла, тем самым ухудшая его качество. При использовании элегазового барботирования такого явления не наблюдается.

Элегаз гораздо эффективнее в качестве диэлектрика, чем воздух. Из-за физических свойств элегаза масляный трансформатор может быть компактнее своих аналогов на воздушном барботировании.

Контроль за интенсивностью охлаждения масла можно осуществлять, измеряя расход элегаза, проходящего через объем трансформатора за единицу времени. Для рационального расходования элегаза и экономии машинного ресурса насосно-компрессорного оборудования необходимо четко поддерживать определенный диапазон температур, одновременно выполняя две задачи: эффективно охлаждать масло в трансформаторе и делать это как можно более экономично.

Таким образом, в системе необходимо иметь цифровое автоматическое устройство, регулирующее расход электротехнического газа, основываясь на непрерывно поступающих показаниях с приборов измерения температуры и давления; также необходим многосторонний анализ газа в рабочем объеме устройства. В процессе решения поставленной задачи было решено в системе элегазового охлаждения масляного трансформатора применить прибор компании «МТЕ» под названием HYDROCAL 1008. Данный прибор служит для он-лайн мониторинга состояния масляных трансформаторов.

Прибор HYDROCAL 1008 предназначен для постоянной установки на маслонаполненном трансформаторе и выполняет

функцию раннего оповещения предаварийного состояния трансформаторов. Также приборы непрерывно производят измерение содержания в масле наиболее важных газов, воды, которые свидетельствуют о возникновении проблем в трансформаторе. Они позволяют записывать показания, устанавливать индивидуальные пороги срабатывания аварийного сигнала, подключать внешние устройства и имеют различные коммуникационные интерфейсы. Прибор имеет программируемые управляющие выходы.

Благодаря тому, что прибор не требует регулярной замены расходных материалов или частей, а также периодического обслуживания, система является необслуживаемой.

Прибор HYDROCAL 1008 — это устанавливаемая на постоянную работу система многостороннего анализа газа в масле с функциями мониторинга трансформатора. Она позволяет произвести индивидуальные замеры влаги и ключевых газов, растворенных в масле трансформатора, таких, как водород ( $H_2$ ), угарный газ ( $CO$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ), метан ( $CH_4$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), этилена ( $C_2H_4$ ) и этан ( $C_2H_6$ ).

## Выводы

Результаты анализа отказов масляных трансформаторов позволяют сделать вывод о необходимости повышения эффективности их системы охлаждения, так как основной причиной выхода трансформаторов из строя является перегрев. Экспериментальные исследования показывают, что барботирование масла пузырьками элегаза позволяет более эффективно охлаждать его, а соответственно и активную часть масляных трансформаторов. Такой способ охлаждения силовых масляных трансформаторов — современное, более эффективное решение для использования на предприятиях и является новым направлением развития трансформаторостроения. Установка эффективна особенно в жаркий период времени, когда масляная система охлаждения не справляется с отводом тепла.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abramov V.O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Mason T.J.** Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. No 2. P. 812–818.
2. **Asadi N., Kelk H.** Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers // *IEEE transactions on power delivery*. 2015. Vol. 30. No 6. P. 2419–2426.
3. **Chang H.M., Choi Y.S., Van Sciver S.W., Choi K.D.** Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen // *Cryogenics*. 2003. Vol. 43. No 10–11. P. 289–596.
4. **Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R., Georgilakis P.S., Fofana I., Salvador Magdaleno-Adame.** A Bibliographic Analysis of Transformer Literature 1990–2000 // *Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 96–121.
5. **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V.** Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 125. P. 201–208.
6. **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Pechkov A.A.** Ultrasonic unit for restoring oil wells // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 45. No 3–4. P. 133–137.
7. **Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S.** Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // *Thermophysics and aeromechanics*. 2012. Vol. 19. No 4. P. 589–606.
8. **Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Гареев И.М., Хисматуллин А.С.** Рекомендации по повышению надежности электрооборудования промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 2 (31). С. 23–26.
9. **Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Хисматуллин А.С.** Применение автоматического режима контроля электрооборудования промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов // *Новое в российской электроэнергетике*. 2016. № 6. С. 28–35.
10. **Камалов А.Р., Хисматуллин А.Г., Хайрулина Д.Д., Хисматуллин А.С.** Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов при помощи элегаза // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017. № 1. С. 54–56.
11. **Лизунова С.Д., Лоханина А.К.** Силовые трансформаторы // *Энергоиздат*. 2004. 616 с.
12. **Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А.** Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 4. Т. 2. С. 271–274.
13. **Салиева Л.М., Зайнакова И.Ф., Хуснутдинова И.Г., Баширов М.Г., Хисматуллин А.С.** Хроматографический метод оценки технического состояния силовых и масляных трансформаторов // *Экологические системы и приборы*. 2015. № 12. С. 35–41.
14. **Хисматуллин А.С., Сураков М.Р., Сынтинмиров А.А.** Повышение охлаждения масляных силовых трансформаторов путем барботажа пузырьков элегаза // *Инженерная физика*. 2017. № 6. С. 27–31.
15. **Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А.** Система охлаждения трансформаторного масла на основе трансцилляторного переноса тепла // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2016. № 4. С. 43–46.
16. **Хисматуллин А.С., Хисматуллин А.Г., Камалов А.Р.** Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением // *Экологические системы и приборы*. 2017. № 2. С. 29–33.
17. **Хисматуллин А.С. [и др.]** Продление ресурса масляных трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / О.О. Кривоконева, Р.И. Кудояров, Е.Ю. Мавлекаев, Е.М. Коньис, И.В. Прахов, А.С. Хисматуллин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2017. Т. 17, № 3. С. 60–66. DOI: 10.145529/power17307.
18. **Хорошев Н.И., Елтышев Д.К., Кычкин А.В.** Комплексная оценка эффективности технического обеспечения энергомониторинга // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 5. С. 716–720.
19. **Хорошев Н.И., Елтышев Д.К.** Многоаспектная оценка технического состояния оборудования электротехнических комплексов // *Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*. 2016. С. 552–556.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХИСМАТУЛЛИН Азат Салаватович** – кандидат физико-математических наук доцент  
Уфимского государственного нефтяного технического университета

E-mail: hism5az@mail.ru

**БАШИРОВ Мусса Гумерович** – доктор технических наук заведующий кафедрой  
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

E-mail: eapp@yandex.ru

**СОЛДАТОВА Евгения Геннадьевна** – студент кафедры «Электрооборудование и авто-  
матика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

E-mail: gadag76@gmail.com

**МАВЛЕКАЕВ Евгений Юрьевич** – студент филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

E-mail: giltanasheal@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.01.2018

## REFERENCES

- [1] **Abramov V.O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Mason T.J.** Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. No 2. P. 812–818.
- [2] **Asadi N., Kelk H.** Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers. *IEEE transactions on power delivery*. 2015. Vol. 30. No 6. P. 2419–2426.
- [3] **Chang H.M., Choi Y.S., Van Sciver S.W., Choi K.D.** Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen. *Cryogenics*. 2003. Vol. 43. No 10–11. P. 289–596.
- [4] **Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R., Georgilakis P.S., Fofana I., Salvador Magdaleno-Adame.** A Bibliographic Analysis of Transformer Literature 1990–2000. *Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 96–121.
- [5] **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V.** Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 125. P. 201–208.
- [6] **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Pechkov A.A.** Ultrasonic unit for restoring oil wells. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 45. No 3–4. P. 133–137.
- [7] **Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S.** Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012. Vol. 19. No 4. P. 589–606.
- [8] **Bashirov M.G., Gribovskii G.N., Galliamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S.** Rekomendatsii po povysheniiu nadezhnosti elektrosnabzheniia promyshlennoi ploshchadki lineino-proizvodstvennogo upravleniia magistral'nykh gazoprovodov. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 2016. № 2 (31). S. 23–26. (rus.)
- [9] **Bashirov M.G., Gribovskii G.N., Galliamov R.U., Khismatullin A.S.** Primenenie avtomaticheskogo rezhima kontrolya elektrosnabzheniia promyshlennoi ploshchadki lineino-proizvodstvennogo upravleniia magistral'nykh gazoprovodov. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2016. № 6. S. 28–35. (rus.)
- [10] **Kamalov A.R., Khismatullin A.G., Khairullina D.D., Khismatullin A.S.** Povyslenie effektivnosti okhlazhdeniia silovykh maslianykh transformatorov pri pomoshchi elegaza. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ia*. 2017. № 1. S. 54–56. (rus.)
- [11] **Lizunova S.D., Lokhanina A.K.** Silovye transformatory. Energoizdat. 2004. 616 s. (rus.)
- [12] **Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A.** Monitoring i remont promyshlennykh silovykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoianiiu. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016. № 4. T. 2. S. 271–274. (rus.)
- [13] **Salieva L.M., Zainakova I.F., Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G., Khismatullin A.S.** Khromatograficheskii metod otsenki tekhnicheskogo sostoianiia silovykh i maslianykh transformatorov. *Ekologicheskiesistemy i pribory*. 2015. № 12. S. 35–41. (rus.)
- [14] **Khismatullin A.S., Surakov M.R., Syntimirov A.A.** Povyslenie okhlazhdeniia maslianykh silovykh transformatorov putem barbotazha puzyr'kov elegaza. *Inzhenernaia fizika*. 2017. № 6. S. 27–31. (rus.)



[15] **Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A.** Sistema okhlazhdeniia transformatornogo masla na osnove transtsiatornogo perenosa tepla. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2016. № 4. S. 43–46. (rus.)

[16] **Khismatullin A.S., Khismatullin A.G., Kamalov A.R.** Issledovanie teploperenosa v promyshlennykh silovykh transformatorakh s elegazovym okhlazhdeniem. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2017. № 2. S. 29–33. (rus.)

[17] **Khismatullin A.S. [i dr.]**. Prodlenie resursa maslianykh transformatorov s dlitel'nym srokom ekspuatatsii / O.O. Krivokoneva, R.I. Kudoiarov,

E.Iu. Mavlekaev, E.M. Konys, I.V. Prakhov, A.S. Khismatullin. *Vestnik IuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2017. T. 17, № 3. S. 60–66. DOI: 10.145529/power17307. (rus.)

[18] **Khoroshev N.I., Eltyshev D.K., Kychkin A.V.** Kompleksnaia otsenka effektivnosti tekhnicheskogo obespecheniia energomonitoringa. *Fundamental'nye issledovaniia*. 2014. № 5. S. 716–720. (rus.)

[19] **Khoroshev N.I., Eltyshev D.K.** Mnogoaspektnaia otsenka tekhnicheskogo sostoianiia oborudovaniia elektrotekhnicheskikh kompleksov. *Trudy IX mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*. 2016. S. 552–556. (rus.)

#### AUTHORS

**KHISMATULLIN Azat S.** — *Ufa state petroleum technological university*

E-mail: hism5az@mail.ru

**BASHIROV Mussa G.** — *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: eapp@yandex.ru

**SOLDATOVA Evgeniia G.** — *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: gadag76@gmail.com

**MAVLEKAEV Evgenii Yu.** — *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: giltanasheal@mail.ru

Received: 24.01.2018