

УДК 621.9.048

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2015 М.Ю. Сариллов, А.С. Линев, Т.А. Отряскина

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 21.11.2015

Представлена общая картина пробоя и его влияние на процесс электроэрозионной обработки. Сделан акцент на явления, возникающие при обработке алюминиевых и титановых сплавов.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, искровой пробой, температура плавления, теплота, единичная лунка, электрод-заготовка, алюминиевые и титановые сплавы.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) в современном единичном, мелко и среднесерийном производстве всё чаще и чаще получает приоритет в использовании, нежели другие способы обработки. Тому есть несколько причин. Во-первых, имеется тенденция на увеличение конструктивной и, соответственно, геометрической сложности деталей машин и аппаратов. Это вызвано совершенствованием и оптимизацией конструкций деталей, а также необходимой экономией дорогостоящего материала заготовки. Во-вторых, неизбежное повышение эксплуатационных характеристик, предъявляемых к ответственным деталям, ведет к практике применения в конструкциях материалов с высокими значениями твердости, химической инертности к действию окружающей среды, прочности по различным видам нагружения и т. п. В-третьих, современная теория и практика ЭЭО имеет в своем арсенале большое количество технологических основ и рекомендаций, что позволяет стабильно получать прогнозируемо отличные результаты по качеству получаемой поверхности и производительности при соблюдении высочайших требований точности изготовления деталей. В некоторых случаях можно достигнуть безысходной обработки (износ электрода-инструмента  $\approx 0\%$ ).

**Практическая значимость** проведенного исследования заключается в приведенных рекомендациях по обработке наиболее распространенных в авиакосмической и судостроительных промышленности типов конструкционных материалов, как алюминиевые и титановые сплавы [3].

*Сариллов Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств».*

*E-mail: sarilov@knastu.ru*

*Линев Александр Сергеевич, аспирант.*

*E-mail: uranus\_123@mail.ru*

*Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств».*

*E-mail: knastu2000@mail.ru*

**Научная новизна** заключается в описанном теоретически и подтвержденном экспериментально явлении появления так называемых «усов», которые влияют на результативность пробоя, тепловые явления на электродах и производительность процесса в целом.

Непосредственно на формирование поверхности электрода-заготовки влияет распределение энергии импульса. Самым подробным образом это было рассмотрено в [1]. Распределение энергии по электродам может быть найдено из выражения:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{ан}} - W_{\text{кат}} = \int_0^{t_{\Sigma}} u(t) i(t) dt - \int_0^{t_{\Sigma}} u_{\text{к}}(t) i(t) dt,$$

где  $W_{\Sigma} = W_{\text{ан}} + W_{\text{кат}}$  – энергия, выделяющаяся на аноде и катоде;  $u(t)$  – напряжение в процессе пробоя;  $u_{\text{к}}(t)$  – напряжение в канале разряда.

Передача энергии разряда электродам обуславливается движениями частиц и молекул, которое можно разделить на 2 вида: движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля и тепловое движение. Эти два вида движения обеспечивают передачу энергии на электроды в виде:

1. Электродная (ионная) компонента (бомбардировка заряженными частицами). Для анода обозначается  $W_{\text{ан}}^{\text{э}}$ , для катода  $W_{\text{кат}}^{\text{э}}$ ;
2. Газокинетическая компонента (термическая бомбардировка частицами составляющими канал разряда).  $W_{\text{ан}}^{\text{т}}$  – для анода,  $W_{\text{кат}}^{\text{т}}$  – для катода;
3. Факельная компонента (торможение факелов паров, проступающих на анод и катод с противоположного электрода),  $W_{\text{ан}}^{\text{ф}}$  и  $W_{\text{кат}}^{\text{ф}}$ ;
4. Лучистая компонента (тепловое излучение),  $W_{\text{ан}}^{\text{л}}$  и  $W_{\text{кат}}^{\text{л}}$ ;

5. Объемная компонента (действие объемного источника тепла),  $W_a^{об}$  и  $W_k^{об}$ .

Общая энергия поступающая на анод и катод в таком случае будет выглядеть в виде:

$$W_a = W_a^s + W_a^m + W_a^e + W_a^u + W_a^{об},$$

$$W_k = W_k^i + W_k^m + W_k^e + W_k^u + W_k^{об}.$$

Для непосредственно для расчета энергии поступившей на электроды необходимо более подробно рассмотреть каждый из описанных выше компонентов.

*Электронная компонента.* Ток в прианодной области обеспечивается исключительно электронами. Поэтому расчет  $W_a^e$  производятся по суммарному действию всех электронов пришедших на анод за время  $t_u$ , т.е. необходимо найти произведение пришедшего на анод электричества и падения напряжения на этом участке:

$$W_a^e = (u_a + \varphi) \int_0^{t_u} i(t) dt,$$

где  $\varphi$  – работа выхода электрона, В;  $u_a$  – величина падения потенциала в прианодной области.

Тут было некоторое отступление от классической теории пробоя. Работа выхода – это некоторое количество энергии, необходимое для извлечения электрона из металла [2]. Она зависит о состояния поверхности ее частоты, шероховатости и др. Энергию связи электрона в металле  $e\varphi$  можно трактовать как работы  $\frac{e^2}{4\alpha}$  против притягивающей силы изображения  $\frac{e^2}{4r^2}$ , которую нужно затратить при удалении электрона на расстояние  $\alpha$  порядка межатомного расстояния на бесконечность. Так как имеется внешнее вытягивающее поле  $E$ , на электрон действует суммарная сила:

$$F = \frac{e^2}{4r^2} - eE.$$

Начиная с расстояния  $r_k = \left(\frac{e}{4E}\right)^{1/2}$ , где  $F = 0$ , и дальше внешнее вытягивающее воздействие превышает силу притяжения к поверхности [6]. Значит, чтобы выбраться из тела, электрону нужно преодолеть лишь расстояние  $r_k$  и энергию притяжения:

$$\int_{\alpha}^{r_k} F dr = \int_{\alpha}^{r_k} \left( \frac{e^2}{4r^2} - eE \right) dr = \frac{e^2}{4\alpha} - e^{3/2} E^{1/2}.$$

Работа выхода уменьшается по сравнению со случаем отсутствия поля на:

$$e\Delta\varphi = e^{3/2} E^{1/2}.$$

Это явление называют эффектом Шоттки.

*Ионная компонента.* Ток на катоде имеет как электронный, так и ионный характер. Поэтому энергию поступающую на катод можно записать как:

$$W_k^i = \alpha_x u_x \int_0^{t_u} i_i(t) dt + u_i \int_0^{t_u} i_i(t) dt + \varphi \int_0^{t_u} i_e(t) dt.$$

где  $\alpha_x$  – коэффициент аккомодации иона;  $u_x$  – падение потенциала в прикатодной области;  $u_i$  – потенциал ионизации иона (усредненное значение);  $i_i$  – ионный ток на катоде;  $i_e$  – электронный ток на катоде.

Первое слагаемое в выражении  $W_k^i$  – кинетическая энергия, полученная от торможения ионов на катоде, второе – энергия их нейтрализации, третий – потери энергии при испарении «электронов»

*Газокинетическая компонента.* Плотность кинетической энергии частиц находится из выражения:

$$\omega_m = \frac{1}{2} \xi n k T_e - \frac{1}{2} \xi n k T_0 = \frac{1}{2} \xi (p(T_e) - p_0),$$

где  $\omega_m$  – удельная энергия теплового движения;  $\xi$  – число степеней свободы;  $n$  – число частиц в единице объема;  $k$  – газокинетическая константа Больцмана,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;  $T_e$  – температура газа;  $T_0$  – начальная температура;  $p$  – давление газа при температуре  $T_e$ ;  $p_0$  – начальное давление.

$p(T_e)$ , являясь функцией от времени, может быть заменено на некоторое постоянное значение  $p_{э\phi}$ . Тогда выражение для общего количества энергии теплового движения частиц в объеме столба разряда может быть записано как:

$$\Omega_m = \frac{1}{2} \xi (p_{э\phi} - p_0) v_c.$$

где  $\Omega_m$  – энергия теплового движения газа в объеме столба разряда;  $v_c$  – объем столба газа.

Электродам передается лишь часть тепловой энергии, и если считать газ одноатомным, а поверхности электродов получают одинаковое количество тепловой энергии, то на единицу площади поверхности электрода приходится

$$W_a^m = \frac{3}{2} b (p_{z\phi} - p_0) v_c,$$

$$W_k^m = \frac{3}{2} b (p_{z\phi} - p_0) v_c,$$

где  $b$  – коэффициент передачи энергии,  $0 < b < 1$ ,

*Факельная компонента.* Под действием разряда поверхность электродов мгновенно ( $10^{-6} - 10^{-7}$  с) разогревается до температуры кипения и выше, что приводит к выбросу паров факелов со скоростями, значительно превышающими скорость звука. Доходя до противоположного электрода, струя факела передает тепловую энергию поверхности. Удельный тепловой поток в этом случае

$$q_c = \alpha [T^* - T_k]$$

где  $q_c$  – поток тепла, подводимый струей факела к поверхности электрода;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  $T_k$  – температура поверхности электрода;  $T^*$  – температура торможения.

Температуру торможения  $T^*$  по гидродинамическим закономерностям можно записать как

$$T^* = T_z \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right); k = \frac{c_p}{c_v},$$

где  $T_z$  – температура факела;  $M$  – число Маха (отношение скорости факела к скорости звука);  $c_p, c_v$  – теплоемкость газа факела соответственно при постоянном давлении и объеме.

Коэффициент теплопередачи  $\alpha$  для турбулентного потока определяется

$$\alpha = \frac{k}{2} c_p \rho_z v_z k_f,$$

где  $\rho_z$  – плотность газа;  $v_z$  – скорость газа;  $k_f$  – коэффициент трения;  $k$  – коэффициент, учитывающий размерность входящих величин.

Если считать температуру газа постоянной и равной некоторой величине эффективно-го значения, то в первом приближении полное количество энергии, подаваемое на поверхность анода можно записать

$$W_a^{\phi} = \frac{k}{2} c_p \rho_{k\phi} v_{k\phi} k_f \left[ T_z \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) - T_k \right] s_a t_{k\phi},$$

где  $W_a^{\phi}$  – энергия, передаваемая катодным факелом аноду;  $\rho_{k\phi}$  – плотность газа катодного факела;  $v_{k\phi}$  – скорость катодного факела;  $s_a$  – площадь поверхности торможения факела об анод;  $t_{k\phi}$  – время действия катодного факела.

Аналогичным способом определяется и факельная компонента на катоде.

*Лучистая компонента.* Газ, находясь в канале разряда при высокой температуре ( $10^4 - 10^5$  К), способен передать часть тепловой энергии в виде излучения. Количество этой энергии полученную анодом или катодом в этом случае может быть найдена по закону Стефана-Больцмана

$$W^l = \delta \varepsilon \sigma T_{z\phi}^4 S t_{z\phi},$$

где  $\delta$  – коэффициент поглощения света поверхностью металла;  $\varepsilon$  – коэффициент черноты плазмы разряда;  $S$  – площадь излучателя;  $t_{z\phi}$  – время действия;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ .

*Объемная компонента.* Это, как правило, то количество энергии, которое выделяется в объеме зоны растекания за счет эффекта Джоуля-Ленца в непосредственной близости от анодного и катодного пятен. Величина этой энергии примерно равна как для анода, так и для катода, и может быть записано как

$$W_z^{j\ell} = \int_0^{t_{z\phi}} I^2(t) R_{z\phi} dt,$$

где  $R_{z\phi}$  – омическое сопротивление зоны растекания тока.

Определив из [1] значение и удельный вес каждой компоненты разряда и решив уравнение теплопроводности [4] можно с определенной степенью точности определить то количество металла, которое будет удалено с поверхности электрода за единичный импульс.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho c(T)} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{\rho c(T)} \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right],$$

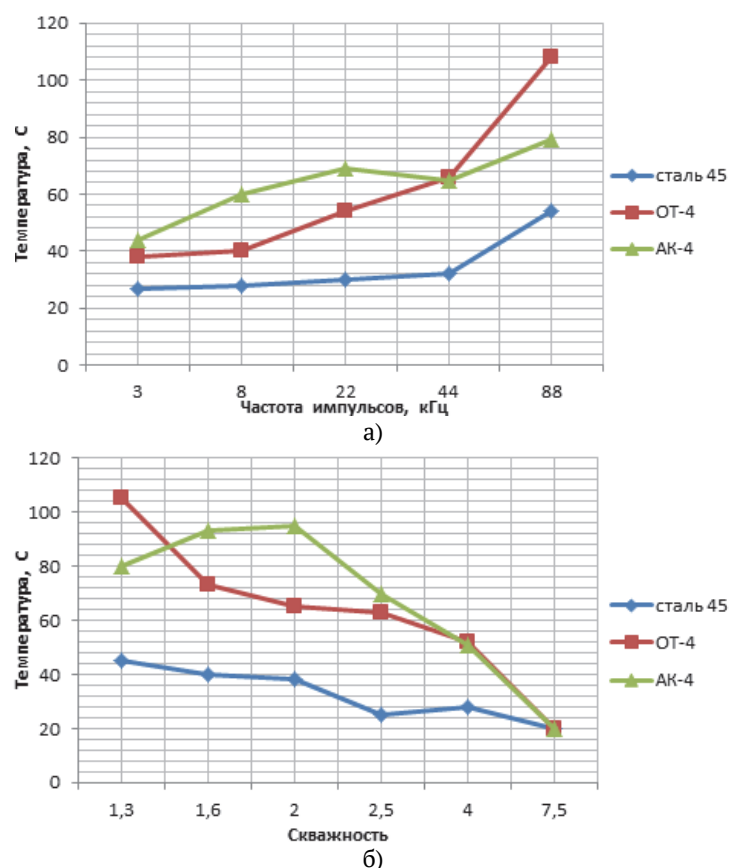
где  $T$  – температура материала электрода;  $t$  – текущее время;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности в направлениях  $r$  и  $z$  при заданной температуре;  $\rho c(T)$  – удельная объемная теплоемкость материала при заданной температуре.

Для подтверждения приведенных закономерностей были проведены экспериментальные исследования на различных видах материалов, чаще всего применяемых в передовых отраслях промышленности.

**Методика и материалы.** Проведя обработку стали 45, алюминия АК-4 и титана ОТ-4 с замером температуры электрода-инструмента, были получены графики, представленные на

рис. 1. Обработку производили на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40-440М. В качестве материала электрода были использован электрод из меди М1.

Расчет по представленному уравнению теплопроводности так же подтверждает, что результаты обработки алюминия в большей степени, а титана в меньшей, не укладываются в представленную теорию. Тогда была выдвинута гипотеза об некоторых особенностях, которые сопровождают процесс ЭЭО этих материалов. Сделано предположение, аналогичное [5], о том, что в процессе разряда, когда объем удаленного из лунки материала достигает определенной величины, появляется вероятность образования «усов» - образований на основе материала электрода, чья длина превышает ширину и толщину, и которые способствуют следующему пробую, эффективно сокращая межэлектродный промежуток.



**Рис. 1.** Зависимость температуры электрода-инструмента от изменения: а - частоты импульсов и б - скважности

Как видно их графиков температура алюминиевого сплава АК-4 и титанового сплава ОТ-4 значительно превышает температуру при обработке при тех же режимах стали 45 (электроэрозионная обрабатываемость которой принята в теории за 1). Однако если для титанового сплава данное явление можно объяснить большей

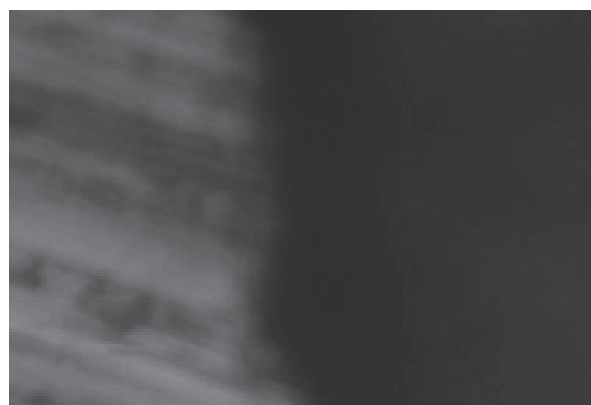
плотностью, более низкой теплопроводностью, более высокой теплоемкостью, что в совокупности приводит к концентрации тепловой энергии в области контакта материала заготовки с каналом разряда. Для алюминиевого сплава такое явление подобным образом объяснено быть не может. Алюминий имеет высокую теплопроводность и

низкую теплоёмкость, что должно способствовать теплоотводу от области обработки. Но этого не происходит, что свидетельствует об значительных отличиях механизма пробоя на алюминиевый сплав. Дальнейшие исследования единичного импульса так же производились с использованием настольного прецизионного электроэрозионного копировально-прошивочного комплекса ДГТ-ЭП-03), а так же микроскопа Neophot 2 с максимальным увеличением  $\times 1000$ .

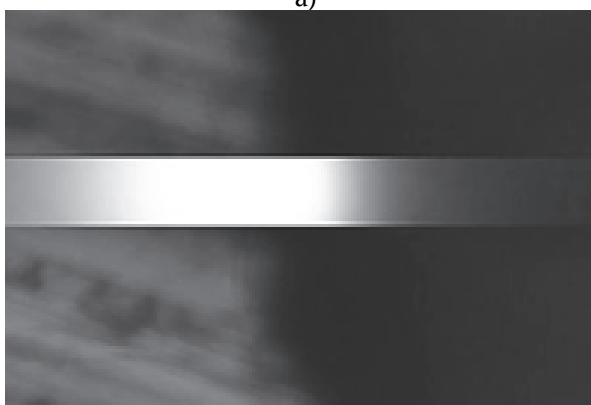
**Результаты и обсуждение.** После того как были получены и обработаны результаты обработки трех видов материалов (сталь, алюминиевый и титановый сплавы) были проведены исследования по подтверждению выдвинутой гипотезы на единичном импульсе. Пробой производился между параллельными плоскостями электродов с минимальной обработкой для получения условий максимально приближенных к условиям обработки. Как видно из фото, отсутствуют какие-либо образования, на краях лунки, которые могут, как-либо влиять на процесс пробоя в последующем. Также можно заметить, что объем лунки имеет небольшое значение, по отношению с теми, которые получаются в результате пробоя в жидком диэлектрике.

Тогда были проведены эксперименты на тех же материалах, но уже в жидкости. На рис. 2 показаны результаты при пробое на алюминий. В качестве жидкого диэлектрика, заполняющего зазор, применялась дистиллированная вода. Как видно на рис. 2б справа от первого кратера имеются нитивидные образования, предположительно и являющиеся усами. Как описывалось ранее, они сокращают расстояние между электродами, за счет чего количество холостых импульсов сокращается, а именно они переходят в разряд рабочих. Соответственно растет количество выделяющейся энергии в процессе обработки. Тем самым можно объяснить наблюдаемые тепловые явления при обработке алюминия и титана. Как видно из хронологии следования снимков (б и в) следующий пробой произошел как раз в месте образования усов.

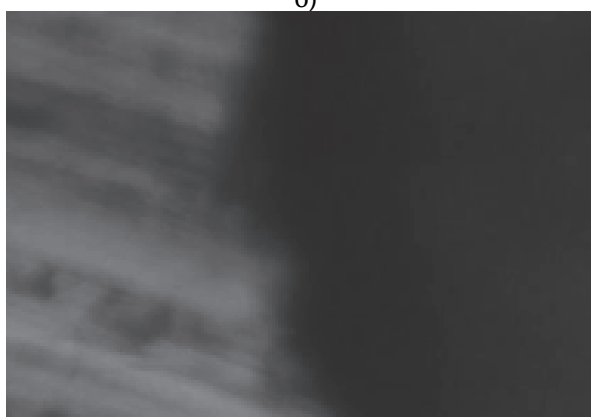
Появление образований, как правило, зависело от энергии импульса, объема получаемой лунки, движения рабочей жидкости между поверхностями электродов и состоянием электродов до и после первого пробоя. К сожалению пока не удалось выявить теоретические закономерности появления усов в виду большого количества фактов влияющих на процесс их появления. Образование усов на алюминии происходило в разы чаще, нежели при титане. Это вполне укладывается в данную теорию, т.к. химическая активность титана при одних и тех же значениях температуры ниже, чем у алюминия. Так же частицы титана тяжелее и образование усов проходит значительно реже.



а)



б)



в)

**Рис. 2.** Пробой в жидком диэлектрике.  $\times 1000$ :  
а - до первого пробоя; б - после первого пробоя;  
в - после второго пробоя

Образование усов на стали не происходило вовсе за все время проведения экспериментов. Обладая низкой химической активностью и коротким промежутком времени отведенном на процессы по результатам которых могут образовываться усы, процесс пробоя на сталь не вызывает отклонений от общей теории пробоя.

**Выводы:**

1. Были внесены уточнения в теорию процесса пробоя между двумя электродами в жидком диэлектрике.
2. Были получены экспериментальные данные по тепловым явлениям на электродах-заготовках из различных материалов в процессе обработки на разных режимах.



3. Была выдвинута и подтверждена экспериментально гипотеза о существовании нитивидных образований после пробоя, которые оказывают влияние на последующий пробой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Золотых, Б.Н.* Физические основы электроэрозионной обработки / *Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер.* – М.: Машиностроение, 1977. 41 с.
2. *Линёв, А.С.* Механизм электроэрозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы / *А.С. Линёв, М.Ю. Сарилов* // – Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 1349-1353.
3. *Солнцев, Ю.П.* Материаловедение / *Ю.П. Солнцев, Е.И. Прякин.* – СПб.: Химиздат, 2004. 736 с.
4. *Сарилов, М.Ю.* Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта. автореф. дис. на соиск. учен. степ. док. тех. наук (05.03.01). – Комсомольск-на-Амуре, 2008. 43 с.
5. *Сарилов, М.Ю.* Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки / *М.Ю. Сарилов, А.С. Линев, А.М. Злыгостев* // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. № 2. С. 57-63.

#### INFLUENCE OF ELECTROEROSION DISCHARGE PROCESS ON EFFICIENCY OF ELECTROEROSIVE PROCESSING OF ALUMINIUM AND TITANIC ALLOYS

© 2015 M.Yu. Sarilov, A.S. Linev, T.A. Otryaskina

Komsomolsk-on-Amur State Technical University

The overall picture of discharge and its influence on process of electroerosive processing is presented. The emphasis on the phenomena arising when processing aluminum and titanic alloys is placed.

*Key words:* electroerosive processing, spark discharge, melting temperature, heat transfer, single hole, electrode-preparation, aluminum and titanic alloys.

---

*Mikhail Sarilov, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department "Machines and Equipment  
of Chemical Productions". E-mail: sarilov@knastu.ru*

*Alexander Linev, Post-graduate Student.*

*E-mail: uranus\_123@mail.ru*  
*Tatiana Otryaskina, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department "Machine and  
Equipment of Chemical Productions".*

*E-mail: knastu2000@mail.ru*