

Гриценко Н.Г., Заец Н.А., Смитюх Я.В.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

**Введение.** Действующие системы автоматизации отечественных спиртовых заводов, как правило, используют одноконтурные системы стабилизации, построенные на основе стандартных алгоритмов управления с использованием классических методов регулирования. Такого рода подходы не удовлетворяют динамически прогрессирующим требованиям к управлению в условиях неопределенности, не обеспечивают оперативность принятия решений и оптимизации режимов основных процессов технологического комплекса (ТК) спиртового завода, не дают возможности для своевременного реагирования на различные технологические ситуации, возникающие в результате изменения основных параметров, вызванного изменением качественных характеристик сырья, значительным уровнем неопределенности поведения объекта, совместным влиянием действующих возмущений. Это часто приводит к нерациональному расходу энергоресурсов и уменьшению производительности каждого отделения и спиртового завода в целом.

Значительное влияние на качество процессов брагоректификации оказывает количество аварийных ситуаций (провал колонны, «захлебывание колонны», наличие этанола в барде, наличие спирта в лютыре), что зависит от стабильной работы системы, соблюдения качественных показателей рабочих режимов колонн, а это, в свою очередь, связано с реакцией и оперативностью правильных действий оператора, который на основе производственного опыта и знаний должен в условиях дефицита времени и информации оперативно изменять технологические режимы для обеспечения успешного функционирования объекта.

Существующие системы автоматизированного управления технологическими процессами не решают главных проблем улучшения показателей себестоимости, качества и энергоемкости спиртового производства, поэтому перед системами автоматизации по изготовлению этилового ректифицированного спирта стоит задача эффективного управления технологическими процессами, направленная на существенное уменьшение энергозатрат при одновременном сохранении качества готового продукта [1].

Альтернативное решение стабилизации работы брагоректификационной установки (БРУ) в составе ТК спиртового производства, улучшения качественных показателей готовой продукции состоит в предотвращении нештатных предаварийных ситуаций и связанных с ними сопутствующих проблем в брагоректификации и реализуется с помощью создания нейросетевой интеллектуальной системы прогнозирования, задачами которой является обнаружение нежелательных производственных ситуаций и их оперативное предупреждение.

**Постановка задачи.** Найти концептуальный подход к созданию интеллектуальной системы прогнозирования вероятности возникновения нештатной предаварийной ситуации, связанной с широко известным среди аппаратчиков БРУ технологическим явлением «провала колонны».

**Материалы и методика исследований.** В спиртовой промышленности ректифицированный спирт получают исключительно из браги, что считается экономически более целесообразным, чем из спирта-сырца. Весь технологический процесс изготовления ректифицированного спирта можно разделить на две части: приготовление браги и брагоректификацию – процесс выделения из нее очищенного от примесей этилового спирта.

Анализ ТК спиртового производства показывает, что наиболее энергоемкими технологическими процессами являются водно-тепловая обработка зерна, перегонка браги и ректификация полученного дистиллята. Заключительным этапом получения готового продукта при производстве является процесс брагоректификации, который осуществляется в нашем случае на БРУ косвенного действия, которая состоит из трех колонн: бражной (БК), элюционной (ЭК) и ректификационной (РК). Характерными чертами данного типа установок являются: получение высокого качества этилового спирта, простота в эксплуатации и параллельно с этим высокое энергопотребление [2].

Каждая колонна отдельно и БРУ в целом являются многомерными объектами управления, поскольку их состояние характеризуется концентрациями компонентов, температурой и давлением. Для поддержания режимов работы любой из колонн необходимо управлять несколькими регулируемыми переменными и одновременно воздействовать на множество входных переменных. Причем изменение одной входной величины приводит к изменению всех или хотя бы нескольких исходных величин. Именно этот аспект и делает трехколонную БРУ непрямого действия многомерным, многосвязным, нелинейным и нестационарным объектом управления [3, 5].

Залогом успешного внедрения эффективной системы автоматизации ТК спиртового производства является детальный анализ технологического процесса изготовления этилового спирта, изучение принципиальных особенностей процесса, выделение причин возникновения нештатных ситуаций на каждом технологическом этапе. В связи с этим необходимо выделить критерии оптимизации режима работы БРУ, учесть ряд технологических особенностей и характеристик, по которым устанавливаются соответствующие режимы работы каждой из колонн.

Для оптимального режима работы БК минимизируют потери спирта из барды и определяют концентрацию спирта в бражном дистилляте, поддерживаемую при условии постоянной подачи браги при изменении подачи пара в колонну и воды в конденсатор с таким расчетом, чтобы при максимально возможной концентрации бражного дистиллята потери спирта в барде были минимальными.

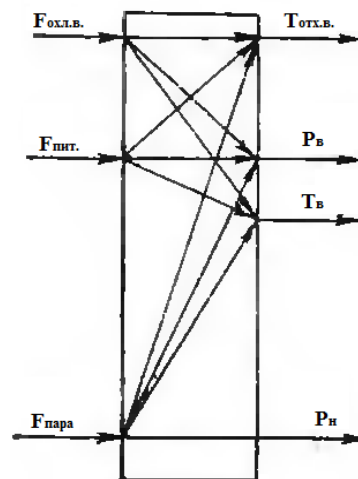


Рисунок 1 – Параметрическая схема бражной колонны

**Гриценко Надежда Георгиевна**, аспирант, ассистент кафедры интегрированных автоматизированных систем управления Национального университета пищевых технологий.

**Заец Наталья Анатольевна**, к.т.н., доцент кафедры интегрированных автоматизированных систем управления Национального университета пищевых технологий.

**Смитюх Ярослав Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и интеллектуальных систем управления Национального университета пищевых технологий.

Украина, 01033, г. Киев, ул. Владимирская, 68.

Для ЭК показателем оптимального режима работы является достаточно полное выделение главных и верхних промежуточных примесей (альдегидов, метанола и др.) при минимальных затратах пара.

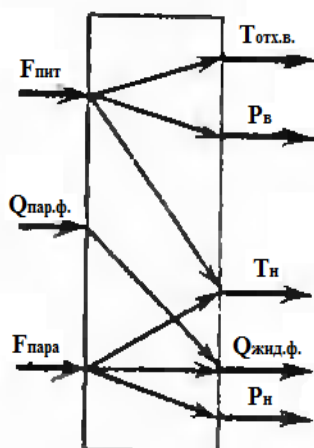


Рисунок 2 – Параметрическая схема элюционной колонны

Для РК – отсутствие потерь спирта с лютерной водой, заданная концентрация ректифицированного спирта и чистота спирта по содержанию примесей. При работе РК, в свою очередь, необходимо обеспечить сбалансированную подачу элюрата в колонну и отбор спирта (пастеризованного и непастеризованного) из колонны.

Нормальной загрузкой колонны следует считать такую, при которой температура на питающей тарелке устанавливается в следующей зависимости от температуры в кубе элюционной колонны

$$t_{пит} = t_{элор} + 2,5(P_{рект} + P_{элор}), \quad (1)$$

где  $t_{элор}$  – температура в кубе элюционной колонны, °С;

$P_{рект}$  и  $P_{элор}$  – давление соответственно на питающей тарелке ректификационной и в кубе элюционной колонн, бар.

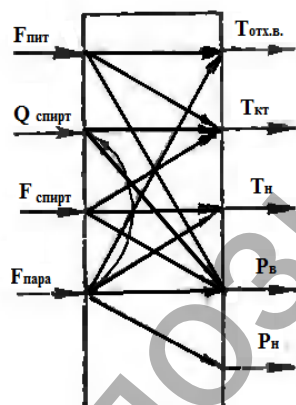


Рисунок 3 – Параметрическая схема ректификационной колонны

Учитывая все технологические особенности, свойства многомерности и многосвязности, а также наличие неконтролируемых возмущений, сложность процессов массо- и теплообмена, процессов гидродинамики БРУ, синтез системы прогнозирования возникновения нештатных ситуаций на таком объекте является актуальной задачей [5].

Существует ряд причин, нарушающих устойчивость технологического процесса, которые приводят к появлению так называемого “провала колонны”, возникновение которого, как правило, ведет к нештатной предаварийной ситуации на спиртовом заводе, а именно – к остановке отбора спирта, подачи браги и к перезапуску всей системы.

Первая и одна из основных причин кроется в качественных показателях пара. Если давление пара, подаваемого с парового коллектора котельной, нестабильное (находится за пределами заданных 4,5 бар), возникает несоответствие соотношения мощности колонны к расходу пара на обогрев колонны. Причем если этот показате

тель уменьшается, то процессы выпаривания и конденсации в колонне не происходят с нужной интенсивностью, все вещества оседают (проваливаются) внизу колонны, отбор промежуточного и основного продукта не происходит и, как результат, – остановка системы с последующим поиском неисправностей. Для предупреждения такой предаварийной ситуации необходимо следить за температурой входящего пара, при условии исправности всех элементов системы. Увеличение рассматриваемого показателя не так критично, поскольку существует возможность уменьшать ход подачи пара с помощью управляющего клапана перед распределением его по колоннам.

Вторая причина связана с износом колонны в сивушной зоне, что сопровождается трудностями отбора сивушного масла на сивушных тарелках, провалом вещества в низ колонны, и как результат, – износом тарелок. Предупреждение такой причины “провала колонны”, а также поддержание ее рабочего режима, возможно за счет увеличения подачи пара в колонну на 5% от заданного.

Проблемы своевременного отбора промежуточных продуктов в сивушных зонах при условии исправности тарелок колонны могут быть связаны с перегрузкой колонны и, как следствие, “провалом колонны”. Устранение такой причины возможно при реализации контура управления отбором сивушного масла по температуре в сивушных зонах [4].

К третьей причине можно отнести изменение температуры охлаждаемой воды в зависимости от времени года ( $T_{охл.воды}$  в летний период 18–22 °С, в зимний 4–8 °С), а температура отходящей воды с дефлегматора стабильно равна 70 °С, в связи с чем происходит недостаточная конденсация, пар не поднимается в верх колонны, а накапливается на поверхности тарелок. Не менее важными причинами “провала колонны” являются: накопление и невозможность вывода примесей, которые сосредоточиваются между нижней (отбор сивушных продуктов) и верхней частями колонны (отбор спирта), таких как N-пропанол; изменение параметров сырья; уменьшение подачи браги и другие.

Для эффективного автоматизированного управления каждой подсистемой и БРУ в целом, необходимо обеспечить устойчивость технологических процессов, не допуская возникновения изложенных выше причин создания нештатных ситуаций в работе БРУ непрямого действия.

**Результаты исследований.** Исходя из опыта создания автоматизированных систем управления технологическими процессами, для синтеза соответствующего интеллектуального блока прогнозирования возникновения нештатных ситуаций использовались нейронные сети (НС), которые характеризуются эффективной работой в условиях размытости входной информации, нелинейности изменения значений параметров, многофакторности – что характерно для БРУ.

На начальном этапе синтеза интеллектуальной системы управления на протяжении 120 дней проводился пассивный эксперимент на Червонослободском спиртовом заводе с созданием базы данных основных технологических параметров и характера устойчивости работы БРУ. Основной детализированный анализ проводился для входных параметров работы БРУ при возникновении реальных нештатных ситуаций, связанных с “провалом колонны”.

На основании проведенных экспериментов и полученных выводов синтезирован интеллектуальный блок прогнозирования возникновения нештатных ситуаций, который позволяет предсказать возникновение “провала колонны” по значениям текущих параметров технологического процесса. В качестве математического базиса нейронных сетей использовались многослойные перцептроны, поскольку алгоритмы их эффективного обучения достаточно р. Для обучения НС применялся алгоритм обратного распространения ошибки [6], который реализуется следующим образом.

Шаг 1. Проинициализировать элементы весовой матрицы (небольшими случайными значениями).

Шаг 2. Подать на входы один из входных векторов, которые сеть должна научиться различать, и вычислить ее выход.

Шаг 3. Если выход правильный, перейти к шагу 4.

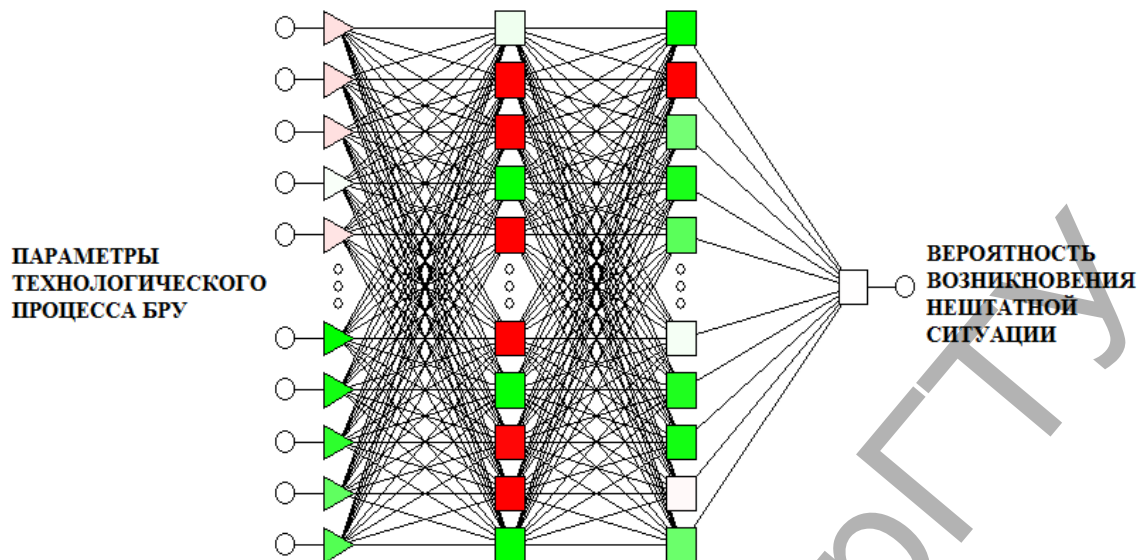


Рисунок 4 – Нейронная сеть прогнозирования нештатных ситуаций работы БРУ

Иначе – вычислить разницу между идеальным  $d$  и полученным  $Y$  значениями выхода (в нашей задаче значение  $d$  представляет показатели качества сточной воды после очистки, а  $Y$  – нормативные требования к таким показателям)

$$\delta = d - Y. \quad (2)$$

Модифицировать вес в соответствии с формулой

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta x_i, \quad (3)$$

где  $t$  и  $(t+1)$  – номера соответственно текущей и следующей итераций;

$\eta$  – коэффициент скорости обучения,  $0 < \eta < 1$ ;

$i$  – номер входа;  $j$  – номер нейрона в слое.

Очевидно, что если  $d > Y$ , то весовые коэффициенты будут увеличены и тем самым уменьшат ошибку. Иначе они будут уменьшены,  $Y$  тоже уменьшится, приближаясь к  $d$ .

Шаг 4. Цикл с шага 2, пока сеть не перестанет ошибаться.

На втором шаге на разных итерациях поочередно в случайном порядке предъявляются все возможные входные векторы (полученные экспериментальным путём [7]).

Для эффективного моделирования в пакете Statistica Neural Networks входные данные автоматически разбиваются на два блока: учебный и контрольный. Входные переменные – параметры технологического процесса БРУ (расход и температура браги, давление и температура сверху и снизу колонны, температура охлаждающей воды, температура воды после дефлегматора и т. д.), выходной параметр – вероятность возникновения нештатной ситуации (0 – штатный режим работы, 1 – нештатная ситуация). В результате решения оптимизационной задачи синтезировано пять НС, из которых выбрана сеть с наименьшей ошибкой MLP 18-14-2 (рис. 4).

В результате исследований подтвердилась адекватность синтезированной согласно представленного алгоритма НС (учебная выборка – 0,91%, контрольная выборка – 0,02%).

Для использования интеллектуального блока прогнозирования возникновения нештатных ситуаций в режиме реального времени хода технологического процесса БРУ очевидна необходимость создания экспертной системы поддержки принятия решений (ЭСППР). Предложена структурная схема интеллектуальной системы предотвращения возникновения нештатных ситуаций (рис. 6).

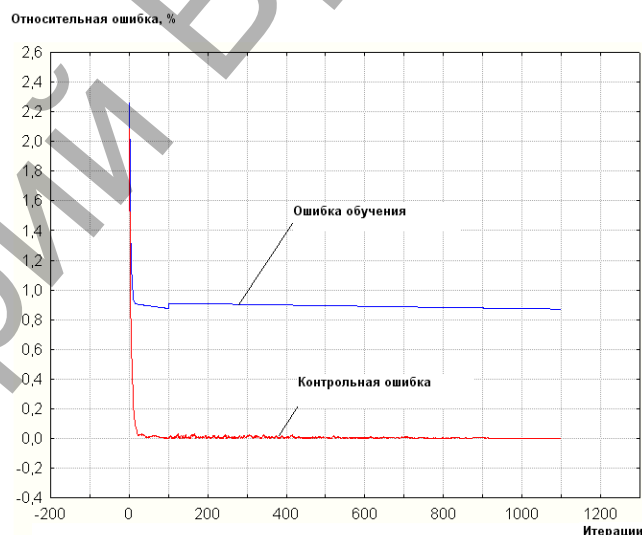


Рисунок 5 – Проверка адекватности нейронной сети MLP 18-14-2

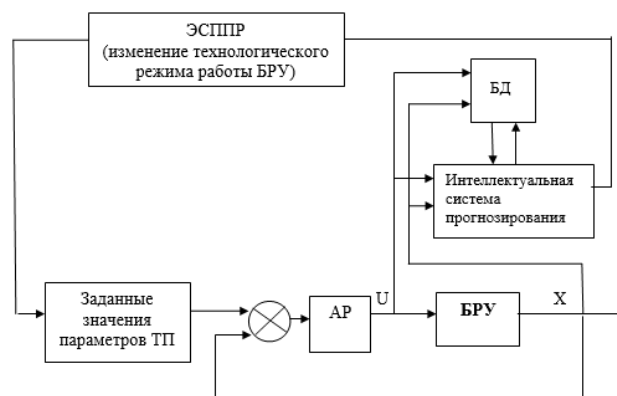


Рисунок 6 – Общая структурная схема интеллектуальной системы предотвращения возникновения нештатных ситуаций, где АР – автоматический регулятор, БД – база данных

В дальнейшем планируется разработать математический аппарат и программное обеспечение ЭСППР, которая, используя экспертные данные, опыт экспертов и прогнозирование нейронной сетью возникновения нештатных ситуаций, будет менять зада-

ния технологического режима функционирования объекта, не допускающая возникновения изложенных выше причин создания нештатных ситуаций в работе БРУ непрямого действия.

**Заключение.** Анализ функциональных характеристик и технологических особенностей брагоректификационной установки косвенного действия в составе технологического комплекса спиртового завода показал необходимость прогнозирования возникновения нештатных ситуаций работы БРУ, связанных с провалом колонны. Предложена структура интеллектуальной системы предотвращения возникновения нештатных ситуаций на производстве, задачами которой является прогнозирование нежелательных производственных ситуаций и мгновенное предупреждение за счет соответствующего изменения заданных технологических параметров регламента.

Внедрение заявленной интеллектуальной системы позволит предвидеть возникновение нештатных предаварийных ситуаций в брагоректификации, избежать нежелательных последствий простоя оборудования и установки в целом, изменения качественного состава основного и вспомогательных продуктов, перерасхода тепло- и энергоносителей установки данного типа.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жолнер, І. Основні напрямки енерго- та ресурсозбереження в спиртовому виробництві / І. Жолнер, В. Сосницький, І. Гулий, А. Українець, П. Шиян // Харчова і переробна промисловість. – 2003. – № 7. – С. 4–6.

2. Гриценко, Н.Г. Сучасні методи керування брагоректифікаційними установками / Н.Г. Гриценко, А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, Я.В. Смітюх, Р.Г. Кириленко. – К.: НУБіП, 2016 р. – № 3(29). – С. 68–78.
3. Мандельштейн, М.Л. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации / М.Л. Мандельштейн. – Москва : Пищевая промышленность, 1975. – 240 с.
4. Стабников, В.Н. Ректификация в пищевой промышленности. Теория процесса, машины, интенсификация / В.Н. Стабников, А.П. Николаев, М.Л. Мандельштейн. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 232 с.
5. Ладанюк, А.П. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів: монографія / А.П. Ладанюк, Н.А. Заєць, Л.О. Власенко – Киев : Видавництво Ліра-К, 2016. – 312 с.
6. Лисенко, В.П. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм / В.П. Лисенко, В.М. Решетюк, В.М. Штепа, Н.А. Заєць [та ін.] – Киев : НУБіП України, 2014. – 336 с.
7. Системи інтелектуального управління опаленням об'єктів з обробкою даних від модулів датчиків реєстрації температури / П.Г. Охріменко, Н.А. Заєць, С.А. Шворов, В.М. Штепа // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків : Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2014. – Вип. 6 (122). – С. 63–67.

Матеріал поступив в редакцію 28.11.2017

#### GRICENKO N.G., ZAIETS N.A., SMITYUKH I.V. Intellectual system for predicting the nonpermanent situations on the alcoholic factory

Analyzed the functional characteristics and technological features of the indirect correction bregorektification station in the composition of the technological complex of the distillery. The reasons for the occurrence of abnormal situations of the operation of the bregorektification unit connected with the failure of the columns were consider. A block diagram of the intellectual system for preventing the occurrence of contingencies in the expert system of decision support is suggest. The system's tasks are to forecast undesirable production situations and instant warning due to a corresponding change in the specified technological parameters of the regulation.

The introduction of the declared intellectual system will allow anticipating occurrence of non-standard pre-emergency situations in the bragorektification, to avoid undesirable consequences of equipment downtime and installation as a whole, changes in the qualitative composition of the main and auxiliary products, over-expenditure of heat and energy carriers.

УДК 621.185.532

**Блохин А.В., Сурус А.И., Лось А.М., Ярмолик С.В.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАЛОСТИ ВТОРИЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Введение.** Сегодня широкий спектр деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения (детали шатунно-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, радиаторы, теплообменники, корпуса навесного оборудования двигателей и редукторов, рычаги подвесок, кронштейны и т. п.), изготавливается из алюминиевых сплавов. Их использование в транспортном машиностроении имеет устойчивую тенденцию к росту. Так, по данным [1], если в 1990 году на один автомобиль уходило в среднем 50 кг этого материала, то к 2005 году эта цифра выросла до 132 кг, а в 2010 г. эта цифра достигла 145 кг [2]. Сегодня средняя масса деталей из алюминиевых сплавов выросла до 152 кг [3], а к 2025 г прогнозируется рост до 250 кг. Исследования, проведенные в этой

области компанией Lucintel, прогнозируют рост потребления алюминия в мировой автомобилестроительной промышленности со средней скоростью 7,4% в год в ближайшие пять лет [4]. Такая тенденция объясняется стремлением производителей автотранспорта снизить массу изделия и повысить топливную экономию, т. к. алюминиевые сплавы характеризуются высокими показателями удельной прочности, повышенной коррозионной стойкостью, а также способностью к поглощению энергии колебаний.

В настоящее время, несмотря на наблюдающийся рост производства и потребления первичного алюминия (в 2000 г. общемировое производство составило около 25 млн т, в 2010 г. – около 42 млн т, в 2016 – более 58 млн т [5]), значительная часть деталей, производится

**Блохин Алексей Владимирович**, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем Белорусского государственного технологического университета.

**Сурус Анатолий Иванович**, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем Белорусского государственного технологического университета.

**Лось Александр Михайлович**, ассистент кафедры материаловедения и проектирования технических систем Белорусского государственного технологического университета.

**Ярмолик Сергей Васильевич**, ассистент кафедры механики и конструирования Белорусского государственного технологического университета.

Беларусь, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Машиностроение