

## О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Илларионов И.Е., Стрельников И.А.

Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова, Чебоксары, Россия

### Аннотация

**Постановка задачи (актуальность работы):** в работе рассмотрена актуальная задача утилизации техногенных отходов промышленных производств. Показано, что использование промышленных отходов, в ряде случаев, значительно уменьшает стоимость конечной продукции. Определено положительное влияние использования техногенных отходов на качество некоторых видов материалов, используемых в литейной промышленности.

**Цель работы:** привлечь внимание научного сообщества к экологическим проблемам, создаваемым техническими предприятиями, и показать положительный эффект от применения отходов техногенного характера в получении более качественных формовочных материалов для литейного производства, снижающих конечную себестоимость выпускаемой продукции. **Используемые методы:** в работе применяются стандартные методы исследования физических и механических свойств формовочных материалов, используемых для литейного производства. **Новизна:** к элементам новизны относятся усовершенствованные составы формовочных смесей, служащих для изготовления литейных форм, стержней и теплоизоляционных оболочек, в состав которых входят экструзионный крахмальный реагент, трепел, зола-унос ТЭС, керамзитовая пыль, шлаки цветной и черной металлургии и др., являющиеся техногенными отходами различных производств. **Практическая значимость:** показана практическая ценность использования отходов промышленных предприятий в литейном производстве, заключающаяся в утилизации части техногенных отходов, увеличении качества материалов, используемых в литейной промышленности, снижении себестоимости выпускаемых отливок и повышении их качества. Определено, что использование отходов при разработке новых материалов перспективно, работа в этом направлении вносит существенный вклад в развитие экономики страны.

**Ключевые слова:** технология, техногенные отходы, литейные формы, стержни, компоненты, составы.

### Введение

В настоящее время наиболее актуальна выработка системных технологий обращения с техногенными отходами, т.к. сложившаяся в Российской Федерации ситуация в области экологической безопасности и обращения с отходами ведет к опасному загрязнению окружающей природной среды и создает реальную экономическую проблему. В то же время наша страна обладает значительными ресурсами вторичного сырья, которые можно характеризовать как возобновляемые сырьевые, материальные и топливно-энергетические ресурсы. По экспертным оценкам объемы накопления отходов в промышленности составляют около 80 млрд т, объемы образования отходов – около 3 млрд т в год (при годовом объеме потребления вторичных сырьевых ресурсов промышленностью менее 1 млрд т). Средний уровень использования отходов в качестве вторичных ресурсов состав-

ляет около одной трети. Массовое накопление на промышленных предприятиях и в других сферах отходов производства и потребления говорит не только о несовершенстве технологий производства и нерациональном использовании отходов в качестве вторичных ресурсов, но и создании экологических проблем [1]. Основные пути решения проблем экологизации экономики и формирования устойчивого типа экономического развития следующие: структурная перестройка экономики, изменение сырьевой ориентации экспорта; разработка и применение природоохраняющих или безотходных технологий, замкнутых циклов производства, глубоко продуманное, наиболее рациональное размещение «грязных» производств; прямые природоохранные мероприятия. Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование как техногенного сырья при получении различного вида продукции и, прежде всего, строительного и металлургического назначения. В проблеме рациональной утилизации промыш-

ленных отходов в единый узел сплелись вопросы охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Решение проблемы ресурсосбережения в различных отраслях возможно при комплексном использовании технических, организационных, экономических факторов и применении современных технологических процессов. Использование промышленных отходов обеспечивает производство дешёвого и часто уже подготовленного сырья; приводит к экономии капитальных вложений, предназначенных для строительства предприятий, добывающих и перерабатывающих сырьё, повышению уровня их рентабельности; высвобождению значительных площадей земельных угодий и снижению степени загрязнения окружающей среды. Повышение уровня использования промышленных отходов является важнейшей производственной задачей. На основе применения отходов промышленности возможно развитие производства не только традиционных, но и новых эффективных строительных и других материалов. Новые материалы обладают комплексом улучшенных технических и технологических свойств и в то же время характеризуются наименьшей ресурсоёмкостью как в процессе производства, так и при применении [2, 3]. Масштабы применения промышленных отходов в производстве строительных материалов в РФ неуклонно увеличиваются. Некоторые виды отходов, как, например, доменные гранулированные шлаки, пользуются достаточным спросом в настоящее время и используются полностью. Передовые металлургические предприятия переходят практически на безотвальную работу. В промышленности накоплен положительный опыт создания комбинированных производств. Это производство глинозёма, содопродуктов и портландцемента на основе нефелиновых шламов и известняков, легированного чугуна и глинозёмистого цемента и др. Значительно меньше, чем доменные, используются пока сталеплавильные шлаки. Объём их составляет около 65%. Незначителен уровень применения шлаков цветной металлургии. Утилизируется лишь около 15% объёма золошлаковых отходов энергетической промышленности, которые наряду с металлургическими шлаками можно отнести к наиболее значительным сырьевым ресурсам для промышленности строительных материалов. Неудовлетворителен пока уровень использования отходов деревообрабатывающей, химической,

нерудной и ряда других отраслей промышленности. Развитие и совершенствование производства современных материалов и продукции, повышение их экономической эффективности на данном этапе в значительной степени будут определяться рациональностью использования сырьевых ресурсов, полнотой вовлечения в производство отходов различных отраслей промышленности. При этом в основе безотходных производств лежит идея комплексного использования сырья. В зависимости от физико-химических свойств отходов, а также от их количества применяют различные методы обезвреживания и переработки: механические, биологические, химические, сорбционные, термические, а также комбинированные. На ряде металлургических предприятий освоена технология регенерации металлов путём переработки шлаков, шламов и др. Каждая тонна алюминия, извлечённого из отходов, обходится в 10 раз, меди – в 6, цинка – в 3,5 и свинца – в 2,5 раза дешевле, чем те же металлы, выплавленные обычным способом – из рудного сырья [3, 4]. Эффективное решение проблемы промышленных отходов – это внедрение безотходной технологии. Безотходные производства основаны на принципиальном изменении технологических процессов, разработке систем с замкнутым циклом, обеспечивающих многократное использование продуктов, и комплексном использовании сырья. При комплексном использовании сырьевых материалов промышленные отходы или побочные продукты одних производств являются исходными материалами других. Важность комплексного использования сырьевых материалов можно рассматривать в нескольких аспектах. Во-первых, утилизация отходов позволяет решать задачи по охране окружающей среды, освобождать ценные земельные угодья, отчуждаемые под отвалы и шламохранилища, устранять вредные выбросы в окружающую среду. Во-вторых, отходы промышленности в значительной степени покрывают потребность ряда перерабатывающих отраслей в сырье, причём во многих случаях высококачественном, подвергнутом в процессе производства первичной технологической обработке (измельчению, обжигу и т.д.). В-третьих, при комплексном использовании сырья снижаются удельные капитальные затраты на единицу продукции и уменьшается срок их окупаемости, снижаются также непроекти-

тельные расходы основного производства, связанные со складированием отходов, строительством и эксплуатацией хранилищ для них; уменьшаются затраты, расход теплоты и электроэнергии на новую продукцию за счёт технологической подготовленности отходов; увеличивается производительность оборудования. К настоящему времени, учитывая эффективность применения многих минеральных и органических отходов в качестве сырьевых ресурсов, отходами их можно считать лишь по отношению к целевой продукции предприятий [2].

### Технические и технологические разработки

В различных отраслях промышленности образуется значительное количество побочных продуктов производственных процессов – материалов техногенного происхождения – отходов, содержащих химические соединения или их комплексы, введение которых в различные смеси (формовочные, стержневые, теплоизоляционные) литейного производства на этапе производства формы, стержней или теплоизоляционных оболочек позволяет достичь результатов, по качеству сопоставимых со стандартными требованиями, а иногда и превышающими их. Например, некоторые техногенные отходы, такие как шламы гальванических производств, золы и шлаки теплоэлектростанций (ТЭС), шлаки цветной и черной металлургии, отходы мукомольного и крахмального производств, в частности экструзионный крахмальный реагент, являются ценным сырьем для получения различной продукции. Кроме того, такие отходы, по опытным данным, могут быть использованы в литейном производстве в составах для приготовления различных смесей.

Авторами [6] предлагается использовать состав для изготовления литейных форм, включающий гипс, кварцевый песок, отличающийся тем, что он дополнительно содержит осадок после нейтрализации гальванического производства, при следующем соотношении компонентов, мас. %:

гипс	30–40
осадок после нейтрализации гальванического производства	20–40
кварцевый песок	остальное

Введение осадка после нейтрализации гальванического производства в указанных количествах позволяет получать формовочные смеси с

оптимальными свойствами, обеспечивающими изготовление качественных литейных форм [5].

Предлагается также использовать смесь для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой, содержащую формовочную глину, огнеупорный наполнитель, связующее и воду, отличающуюся тем, что в качестве связующего смесь содержит экструзионный крахмальный реагент при следующем соотношении ингредиентов, мас. %:

формовочная глина	4–5
экструзионный крахмальный реагент	1–5
вода	2–4
огнеупорный наполнитель	остальное

Таким образом, введение реагента в указанных количествах позволяет получать формовочные смеси с оптимальными свойствами, обеспечивающими изготовление качественных литейных форм. При этом уменьшается стоимость формовочных смесей за счет низкой стоимости реагента, являющегося отходом мукомольного и крахмального производств. Экструзионный крахмальный реагент является готовым материалом, включающим в себя отходы производства. Дальнейшей дополнительной обработке (помолу и просеиванию) данный реагент перед употреблением в формовочной смеси не подвергается. Введение в состав экструзионного крахмального реагента, который представляет собой тонкодисперсное вещество с весьма малым размером частиц, позволяет увеличить прочностные характеристики смеси. Оптимальное содержание реагента в смеси находится в пределах 1–5% [6].

В настоящее время основным потребителем доменных шлаков является цементная промышленность. Для цементной промышленности также перспективными являются некоторые другие виды металлургических шлаков: феррохромовый, позволяющий получать цветной портландцементный клинкер; никелевые и медные, применяемые в качестве железистого компонента сырьевой цементной смеси и активной минеральной добавки: шлаки алюмотермического производства ферросплавов и вторичной переплавки алюминия и его сплавов – как сырьё для производства глинозёмистого цемента и сверхбыстротвердеющего портландцемента; сталерафинировочные шлаки, пригодные для получения расширяющихся цементов. Для получения шлаковых вяжущих автоклавного твердения возможно применение как гранулированных, так и медленно охлаждённых сталеплавильных шла-

ков и шлаков цветной металлургии. На металлургических заводах образуется значительное количество различных железосодержащих пылей и шламов. Они с успехом могут применяться в качестве железистой корректирующей добавки в производстве портландцементного клинкера. Железосодержащие добавки используются также при получении керамзита для улучшения вспучивания и спекания глинистого сырья. Кроме того, предлагается использовать теплоизоляционную смесь для утепления прибылей отливок, содержащую металлофосфатное связующее и отход ваграночного производства чугуна, отличающуюся тем, что она дополнительно содержит трепел, а в качестве фосфатного связующего – алюмохромфосфатное связующее при следующем соотношении компонентов, мас. %:

алюмохромфосфатное связующее	8–12
трепел	5–10
отход ваграночного производства чугуна	остальное

Полученная смесь для утепления прибылей отливок обладает повышенной формуетостью и улучшенными физико-механическими свойствами, в результате улучшается охрана окружающей среды за счёт утилизации отхода ваграночного производства и снижается себестоимость за счёт использования промышленных отходов и природного трепела, утилизируются отходы производства, решается экологическая проблема [7].

Подобранная совокупность компонентов и их количественное соотношение обеспечивает увеличение теплоизолирующего эффекта смеси при достаточных физико-механических свойствах, необходимых для изготовления теплоизоляционных оболочек и вставок.

К отходам топливно-энергетической промышленности относятся продукты, получаемые в виде отходов при добыче, обогащении и сжигании твёрдого топлива. Эту группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому составу, химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости. При сжигании твёрдых видов топлива в топках тепловых электростанций (ТЭС) образуются зола в виде пылевидных остатков и кусковый шлак, а также золошлаковые смеси. Они являются продуктами высокотемпературной обработки минеральной частицы топлива. Зола-унос представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий в ос-

новном из частиц размером 5–100 мкм. Её химико-минералогический состав соответствует составу минералогической части сжигаемого топлива. Авторами [8] предлагается использовать золу-унос ТЭС в составе смесей для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Смесь содержит, мас. %: формовочную глину – 2,5–3,5; алюмохромфосфатную связку – 3,0–4,0; воду – до 1,0%; золу-унос ТЭС – 0,5–1,5; огнеупорный наполнитель – остальное. Смесь готовят путём сухого перемешивания огнеупорного наполнителя (кварцевого песка), формовочной глины и золы-уноса ТЭС в течение 2–3 мин. Далее вводят воду и перемешивают 5–6 мин, после чего вводят алюмохромфосфатное связующее (АХФС) и перемешивают ещё 3–4 мин. Итого общее время перемешивания – не более 13 мин. Образцы сушат при 180–200°C в течение 20–30 мин. Вода в количестве 0,4–0,6% необходима для повышения адгезии глины к огнеупорному наполнителю. При содержании воды менее 0,4% увеличивается осыпаемость смеси, а при содержании более 0,6% снижается прочность в сыром состоянии. Добавка золы-уноса ТЭС в количестве 0,5–1,5% снижает прилипаемость смеси к оснастке, повышает прочность в высушенном состоянии, уменьшает осыпаемость. При более низком содержании золы-уноса не достигается необходимое значение прилипаемости, а при более высоком не наблюдается дальнейшее улучшение свойств смеси. Зола-унос ТЭС представляет собой тонкодисперсное вещество с весьма малым размером частиц, что позволяет использовать её без помола. Таким образом, использование данного изобретения позволит улучшить условия труда, повысить прочность стержней и форм, газопроницаемость, снизить газотворность, а также расширить арсенал средств данного назначения.

Предлагается также использовать смесь, содержащую в составе керамзитовую пыль для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Смесь содержит, масс. %: формовочную глину – 3,0–3,5; крахмалит – 0,3–0,5; воду – 0,8–1,0; алюмохромфосфатное связующее (АХФС) – 3,0–4,0; керамзитовую пыль – 0,5–1,0; огнеупорный наполнитель – остальное [9].

Изобретение относится к литейному производству, а именно к составам смесей для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой. Крахмалит представляет собой продукт на основе кукурузного крахмала, получаемый при термообработке крахмалобелковой суспензии на вальцовый сушке. Цель



изобретения – улучшение качества форм и стержней за счёт повышения их прочности в сухом состоянии, увеличения газопроницаемости. Предлагаемую смесь готовят путём сухого перемешивания огнеупорного наполнителя, формовочной глины и керамзитовой пыли в течение 2–3 мин. Одновременно готовится суспензия воды и крахмалита. Далее вводят суспензию в сухую смесь и перемешивают 5–6 мин, после чего вводят АХФС и перемешивают ещё 3–4 мин. Общее время перемешивания не более 13 мин. Образцы сушат при 180–200°C в течение 10–20 мин. Керамзитовая пыль – пылевидный отход керамзитового производства, имеет следующий химический состав, мас. %: оксид кремния – 48–80; оксид алюминия – 7–27; оксиды железа – 0,5–13,5; оксид кальция – 0,5–20,0; оксид магния – 0,3–12,0; оксиды калия и натрия – 0,5–7,5. Керамзитовая пыль в пределах 0,5–1,0 обеспечивает интенсивное объёмное твердение, ускоряет сушку, препятствует прилипаемости смеси к оснастке. При более низком содержании керамзитовой пыли не достигается значение интенсификации твердения, прилипаемости и прочности в высушенном состоянии, а при более высоком – увеличивается осыпаемость. Формовочная глина в количестве 3,0–3,5 мас.% обеспечивает сырую прочность смеси. При содержании глины ниже 3 мас.% не обеспечивается требуемая прочность на сжатие в сыром состоянии, а при содержании свыше 3,5 мас.% возрастает осыпаемость смеси. Вода в количестве 0,8–1,0 мас.% необходима для повышения адгезии глины к огнеупорному наполнителю. При содержании воды менее 0,8 мас.% увеличивается осыпаемость смеси, а при содержании свыше 1 мас.% снижается прочность в сыром состоянии. Использование предлагаемого изобретения позволит улучшить условия труда, повысить прочность стержней и форм, газопроницаемость, снизить осыпаемость, а также расширить арсенал средств данного назначения и утилизировать отходы керамзитового производства.

### Заключение

Перед современным литейным производством ставятся задачи по снижению себестоимости, повышению качества и товарного вида отливок, а также по повышению экологической безопасности производства. Решение этих задач во многом связано с разработкой новых, более

технологичных составов формовочных и других смесей, а также с оптимизацией существующих способов их приготовления и упрочнения.

Комплексное использование сырья и техногенных отходов производства даёт возможность увеличить выпуск многих видов продукции на 25–30%, снизить ее себестоимость в несколько раз.

Проблемы утилизации отходов промышленных производств становятся всё более актуальными. Практика показывает, что основная масса всех образующихся технологических отходов не может быть переработана (утилизирована) на тех предприятиях, где данные отходы образуются. Распространение получает практика использования отходов в смежных отраслях. При этом особая роль при решении данной проблемы отводится литейно-металлургическому производству – основной заготовительной базе машиностроения [10].

### Список литературы

1. Илларионов И.Е., Жупавлёв Ю.А., Стрельников И.А. Экологические проблемы металлургического производства: конспект лекций. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. 88 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д.: Феникс, 2007. 368 с.
3. Основы промэкологии, теории процессов и аппаратов очистки технологических и аспирационных газов литейно – металлургических и смежных производств: монография. Ч. 1 / И.Е. Илларионов, И.О. Леушин, В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, В.В. Новоселов; под общ. ред. Илларионова И.Е. Чебоксары; Н. Новгород: НГТУ, 2003. 196 с.
4. Основы промэкологии, теории процессов и аппаратов очистки технологических и аспирационных газов литейно-металлургических и смежных производств: монография. Ч. 2 / И.Е. Илларионов, И.О. Леушин, В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, В.В. Новоселов; под общ. ред. Илларионова И.Е. Чебоксары; Н. Новгород: НГТУ, 2003. 216 с.
5. Пат. 2187404 Российская Федерация. Состав для изготовления литейных форм / Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Никитин С.И. Бюл. №23, 2002.
6. Пат. 2267376 Российская Федерация. Состав для изготовления литейных форм и стержней / Стрельников И.А., Евлампиев А.А., Иванова Л.А. Бюл. №01, 2006.
7. Пат. 2356688 Российская Федерация. Теплоизоляционная смесь для утепления прибылей отливок / Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Петрова Н.В., Журавлев А.Ф. Бюл. №15, 2009.
8. Пат. 2033880 Российская Федерация. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Илларионов И.Е., Стрельников И.А.
9. Пат. 2026766 Российская Федерация. Смесь для изготовления литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой / Илларионов И.Е., Стрельников И.А.
10. Шлам селективных ванн термических цехов – перспективный материал для литейно-металлургического производства / А.Н. Грачёв, О.С. Кошелев, И.О. Леушин, Л.И. Леушина, К.А. Маслов // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №10. С. 6–8.

Материал поступил в редакцию 27.10.16.

## ON THE APPLICATION OF INDUSTRIAL WASTE IN FOUNDRY INDUSTRY

**Ilya E. Illarionov** – D.Sc. (Eng.), Professor, Academician of RANS, Distinguished Scientist of the Russian Federation, Distinguished Scientist of the Chuvash Republic  
Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

**Igor A. Strelnikov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor  
Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** This paper is concerned with an urgent problem of industrial waste utilization. The authors show that in some cases the utilization of industrial waste results in a considerably reduced final product cost. It was found that the application of industrial waste can have a positive effect on the quality of some of the materials used in the foundry industry. **Objectives:** The objective is to draw the attention of the academic community to the environmental problems caused by industrial sites and to demonstrate that the application of industrial waste can improve the quality of moulding materials applied in foundry industry while reducing the cost of the final product. **Methods applied:** This research is based on the standard methods of analyzing the physical and mechanical properties of moulding materials used in foundry industry. **Originality:** The originality of this research includes enhanced chemical compositions of moulding sand mixtures used to produce foundry moulds, cores and heat insulating covers, which include extrusion starchy agent, tripoli powder, flue ash from heat power-stations, haydite dust, slag from non-ferrous and ferrous metallurgy etc., all of which are the types of industrial waste. **Practical Relevance:** The authors show what practical value the industrial waste can have in the foundry industry. This includes a partial utilization of industrial waste, an improved quality of the foundry materials, reduced casting costs and an enhanced quality of castings. It was established that the use of waste products has a great potential in the development of new materials and that further research in this area can boost the national economy.

**Keywords:** Technology, industrial waste, moulds, cores, components, compositions.

### References

1. Illarionov I.E., Zhuravlev Yu.A., Strelnikov I.A. Environmental problems of steel industry: lecture notes. Cheboksary: Publishing House of the Chuvash University Press, 2015, 88 p.
2. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Construction materials made from industrial waste. Rostov-on-Don: Feniks, 2007, 368 p.
3. Illarionov I.E., Leushin I.O., Ulyanov V.A., Gushchin V.N., Novoselov V.V. Fundamentals of industrial ecology, the theory of processes and gas purification devices installed in foundries and at related sites: monograph, part 1. Ed. by I.E. Illarionov. Cheboksary – Nizhny Novgorod: Novosibirsk State Technical University, 2003, 196 p.
4. Illarionov I.E., Leushin I.O., Ulyanov V.A., Gushchin V.N., Novoselov V.V. Fundamentals of industrial ecology, the theory of processes and gas purification devices installed in foundries and at related sites: monograph, part 2. Ed. by I.E. Illarionov. Cheboksary – Nizhny Novgorod: Novosibirsk State Technical University, 2003, 216 p.
5. Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Nikitin S.I. A composition for the production of casting moulds. Patent RF, no. 2187404, 2002.
6. Strelnikov I.A., Evlampiev A.A., Ivanova L.A. A composition for the production of casting moulds and cores. Patent RF, no. 2267376, 2006.
7. Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Petrova N.V., Zhuravlev A.F. Heat-insulating mixture for the insulation of the head of castings. Patent RF, no. 2356688, 2009.
8. Illarionov I.E., Strelnikov I.A. A mixture used in the production of casting moulds and cores. Patent RF, no. 2033880, 1995.
9. Illarionov I.E., Strelnikov I.A. A mixture used in the production of casting moulds and air-blown cores. Patent RF, no. 2026766, 1995.
10. Grachev A.N., Koshelev O.S., Leushin I.O., Leushina L.I., Maslov K.A. Nitro bath slag found in heat treatment lines – Novel material for foundry industry. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in machine building industry]. 2013, no. 10, pp. 6–8.

Received 27/10/16

Илларионов И.Е., Стрельников И.А. О применении техногенных отходов в литейном производстве // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 36–41. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41

Illarionov I.E., Strelnikov I.A. On the application of industrial waste in foundry industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 36–41. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-36-41