

$R_g$  – радиус окружности беговой дорожки внутреннего кольца;

$R_n$  – радиус окружности беговой дорожки наружного кольца;

$Z_1$  – число тел качения в нагруженной зоне;

$Z_2$  – число тел качения в ненагруженной зоне;

$H$  – суммарное смещение центров колец;

$\delta_0$  – радиальный зазор;

$\varphi$  – половина угла зоны нагружения;

$r$  – радиус тела качения;

$f_c, f_e, f_n$  – коэффициенты трения соответственно в контакте те-

ла качения с сепаратором, внутренним и наружным кольцами.

Зная гидродинамические потери на трение вращающихся элементов подшипника в смазке и, вычислив момент трения в контактных зонах по формуле (4), общий момент трения в подшипнике качения можно определить как сумму этих потерь.

Одним из резервов снижения потерь на трение в подшипниках качения и, как следствие, повышения их ресурса является замена стальных тел качения керамическими [2, 3]. При большой частоте вращения центробежные силы могут достичь таких значений, которые приведут к повреждению тел качения. Учитывая, что керамические тела качения на 2/3 легче стальных, центробежные силы уменьшаются и подшипник может работать при более высоких скоростях.

Керамика обладает достаточной высокотемпературной твердостью, стабильностью размеров, высокой коррозионной устойчивостью и свойством электроизоляции, отсутствием магнитных свойств. При этом из керамики можно выполнить только тела качения или весь подшипник.

Малая плотность керамики, её высокая твердость, малый коэффи-

циент линейного расширения и высокотемпературная прочность, размерная стабильность в широком температурном интервале делают данный материал весьма перспективным для подшипников качения.

**Заключение.** Таким образом, анализ работы подшипниковых узлов промышленных редукторов показывает, что даже в одном и том же редукторе подшипники качения работают в различных условиях. Предложен ряд рекомендаций по использованию некоторых типов подшипников качения. Для высокоскоростных роликовых подшипников с короткими цилиндрическими роликами предложено оценивать эффективность циркуляционной смазки коэффициентом  $K$ . Для этих подшипников предложена формула для определения в них общего момента трения с учетом коэффициента трения и величины нормальных давлений в контактных зонах. Коэффициент трения рекомендуется определять по экспериментально-теоретической зависимости, полученной для качения со скольжением в масляной среде.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Санюкевич, Ф. М. Влияние условий и режимов смазки на интенсивность проскальзывания в роликовых подшипниках / Ф. М. Санюкевич, А. Т. Бельский // Материалы научно-технической конференции «Наука и технический прогресс в машиностроении», Гомель, 10–12 октября 1974 г. / Гомельский филиал Белорусского политехнического института – Минск: БПИ, 1974. – С. 84.
2. Детали машин: учебник для вузов / Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, М. Н. Захаров [и др.]; под ред. О. А. Ряховского – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 465 с.
3. Черменский, О. Н. Подшипники качения: справочник-каталог / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

Материал поступил в редакцию 23.10.2018

#### SANYUKEVICH F. M., MONTIK S. V. Operation features of roller bearings in mechanical drives assemblies

The paper examines operation features for various types of roller bearings in the assemblies of mechanical drives. The effectiveness of circulating lubrication for radial roller bearing with short cylinder rollers is assessed. The formulas for defining the friction factor and friction moment in given bearings are offered.

УДК 678.01

Шупан П. И., Лещик С. Д., Шавирин П. Д.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА 6

**Введение.** Для повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости металлических поверхностей используются полимерные композиционные покрытия с добавлением различных модификаторов и наполнителей. Перспективным направлением является создание композиционных покрытий на основе полиамидов, что позволяет улучшить эксплуатационные и физико-механические свойства различных изделий и деталей. Композиционные полимерные покрытия, в отличие от обычных металлических покрытий, обладают высокой химической и коррозионной стойкостью. Определяющая роль при формировании покрытий с улучшенными характеристиками принадлежит веществам второй фазы (модификаторам), благодаря которым значительно улучшаются механические и антикоррозионные свойства. В качестве модификаторов при формировании композиций в последнее время используются ультрадисперсные порошки различных металлов, поверхностно-активные вещества и различные наноструктуры металлических и неметаллических веществ. Известно, что в машиностроении полиамиды используются как конструкционные материалы и содержат такие добавки, как стекло- и углеволокна, графит, тальк и масла [1].

Вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин и механизмов приобретают в настоящее время все

большую актуальность. Традиционные конструкционные материалы в условиях увеличения рабочих скоростей и нагрузок, воздействия агрессивных сред и температур не обеспечивают надежности и долговечности оборудования [1, 2].

Решение этих вопросов связано с изменением свойств поверхностных слоев изделий. Для защиты от коррозии и придания изделиям специальных свойств с целью увеличения их долговечности и работоспособности используются покрытия, изменяющие свойства их поверхности. В настоящее время более 80% всех поверхностей защищается лакокрасочными полимерными покрытиями [1, 2].

Покрытия из полиамидов обладают высокими антифрикционными характеристиками. По износостойкости при сухом и жидкостном трении полиамиды превосходят не только другие классы полимеров, но и многие металлы, применяющиеся в антифрикционных целях. Низкий коэффициент трения при высоких нагрузках позволяет использовать полиамиды в тяжело нагруженных узлах трения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов трения покрытий из полиамидов при трении со смазкой по стали. Недостатком полиамидных покрытий является склонность к старению и значительное водопоглощение. С повышением температуры гигроскопичность возрастает [1].

Шупан Павел Иванович, ст. преподаватель кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета им. Я. Купаль.

Шавирин Павел Дмитриевич, выпускник магистратуры специальности 1-378001 «Транспорт» Гродненского государственного университета им. Я. Купаль.

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

Машиностроение

Модифицирование позволяет качественно повысить необходимые свойства покрытий. Композиционные материалы независимо от их происхождения являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых образует матрицу (связующее), а другой (наполнитель) обладает высокой прочностью и определенными функциональными свойствами; при этом композиционные материалы имеют свойства, которыми не обладают их отдельные компоненты. Существует достаточно большой ассортимент полиамидов, выпускаемых промышленностью, однако к наиболее широко производимым полимерам отечественного происхождения относятся ПА-6, ПА-66, ПА-610.

Полиамидные покрытия наносят на поверхность изделий напылением порошков, литьем под давлением, а также из растворов. Следует отметить низкую стойкость полиамидов к окислению, что препятствует длительной эксплуатации полиамидных покрытий на воздухе при температурах выше 60–100 °С. В целях повышения термостабильности полиамидов применяют различные стабилизирующие добавки органического и минерального происхождения [1].

Для улучшения адгезионных и когезионных свойств, повышения эксплуатационных характеристик в покрытия из полиамидов вводят различные наполнители. Введение небольших количеств оксидов титана, меди, железа, свинца и алюминия способствует росту прочности и твердости, несущей способности и износостойкости покрытий при незначительном изменении коэффициента трения. Повышение теплостойкости и несущей способности подшипников с полиамидными покрытиями достигается введением порошков металлов (алюминия, свинца, бронзы и др.). Снижению коэффициента трения также способствует добавка фторопласта-4, дисульфида молибдена, графита. Модифицированные покрытия на основе полиамидных слоев применяют для изготовления таких деталей, как шестерни, подшипники и т. д. [1].

Для улучшения триботехнических, физико-механических и эксплуатационных характеристик антифрикционных материалов актуальным является использование различных модификаторов, в частности, олигомалеимидаоминофенилена (ОМИАФ) и олигомалеимидогидроксифенилена (ОМИГФ). Известно, что они используются для получения покрытий с повышенной коррозионной стойкостью и твердостью и применяются для получения защитно-декоративных лаковых и эмалевых покрытий на загрунтованных и не загрунтованных металлических поверхностях в автомобилестроении и сельскохозяйственном машиностроении [3].

Актуальность работы обусловлена всевозрастающими требованиями к функциональным покрытиям, применяемым для увеличения технического ресурса деталей машин; практическим интересом к недорогому полиамидам отечественного производства.

Цель работы состоит в исследовании структуры, защитных свойств и триботехнических параметров полимерных композиционных покрытий на основе полиамида 6 (ПА 6), содержащих в качестве модификатора олигомалеимидаоминофенилен (ОМИАФ) и олигомалеимидогидроксифенилен (ОМИГФ).

**Материалы и методы эксперимента.** При получении покрытий использовали порошок полиамида 6 (ОСТ 6-03-09-93) с дисперсностью частиц 80–180 мкм. Модификаторы в количестве 0,3 масс. % добавляли в полиамид 6. Покрытия наносились на металлические подложки круглой формы из стали 40Х в псевдоожоженном слое.

Процесс подготовки образцов состоял из следующих последова-

тельно выполняемых операций: **1.** Получение подложек. Стальные пластины нарезали в соответствии с необходимыми размерами. **2.** Подготовка поверхности подложки перед нанесением покрытия. Поверхности стальных пластин подвергали шлифовке до шероховатости  $R_a = 0,16-0,08$ ,  $R_z = 0,04-0,08$ . **3.** Обезжиривание поверхности этиловым спиртом. **4.** Монтаж стальных образцов на подвесках. **5.** Нагрев подложек. Стальные пластины с подвесками нагревали в муфельной печи до температуры 230 °С. **6.** Нанесение композиционного покрытия в псевдоожоженном слое. Мелкодисперсные частицы порошка, переведенные в псевдоожоженное состояние с помощью сжатого воздуха, соприкасаясь с нагретыми подложками, оплавливались, образуя на поверхности монолитное покрытие. Время погружения – 7 сек. **7.** Охлаждение образцов. Толщина композиционного покрытия составляла от 30 до 250 мкм.

Изучение морфологии поверхности композиционных покрытий производилось с помощью метода оптической микроскопии. Использовали инверсный металлографический микроскоп ММР-1600Т. Исследование на микроскопе проводилось в светлом поле при прямом освещении (возможно исследование в темном поле, в поляризованном свете, методом фазового контраста и интерференции).

Триботехнические испытания проводили на микротрибометре FT-2, предназначенном для исследования параметров трения и изнашивания материалов по схеме «сфера-плоскость» без смазочного материала с нагрузкой 20 Н [4].

Коррозионную стойкость базовых и модифицированных полимерных покрытий оценивали по ГОСТ 9.308-85 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний». Испытания проводились в «камере соляного тумана» при повышенных температурах (для испытаний использовали морскую соль с концентрацией 10%, температура – 50 ± 5 °С); время испытания – 246 часов. Степень коррозионного поражения покрытий определяли по методу С [5].

Степень поражения  $X_C$  в процентах вычисляли по формуле:

$$X_C = \frac{n_c}{N_c} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $n_c$  – число квадратов с ржавчиной;  $N_c$  – общее число квадратов на поверхности образца.

Адгезионные испытания проводились методом решетчатого надреза согласно ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии». Сущность метода заключается в нанесении на готовое покрытие решетчатых надрезов, с единичным квадратом размером 1x1 мм, и визуальной оценке состояния покрытия по четырехбалльной системе [6].

**Результаты исследований.** Известно, что структура материала зависит от величины, формы, строения макромолекул, характера взаимодействия с частицами модификатора и обуславливает важнейшие физико-механические и эксплуатационные свойства.

Микроструктуру сформированных покрытий изучали методом оптической микроскопии с использованием инверсного металлографического микроскопа ММР-1600Т. Исследования на микроскопе проводились в светлом поле при прямом освещении и с увеличением 20x.

Результаты исследований микроструктуры сформированных покрытий методом оптической микроскопии представлены на рисунке 1.

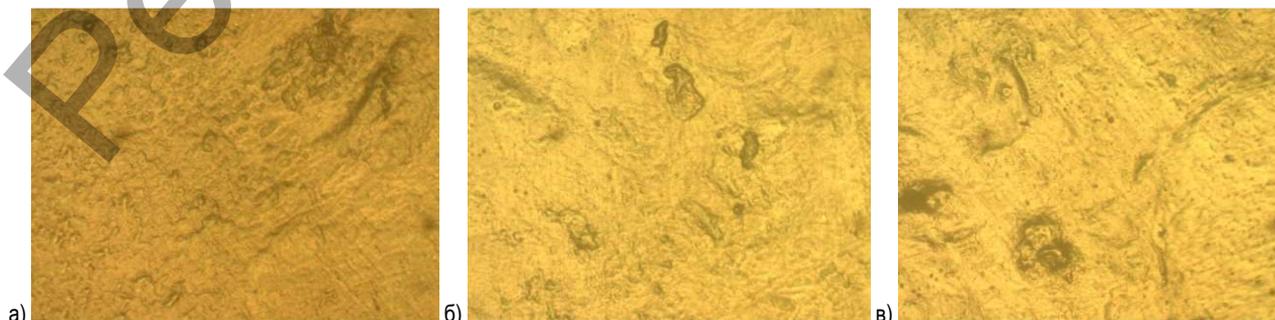


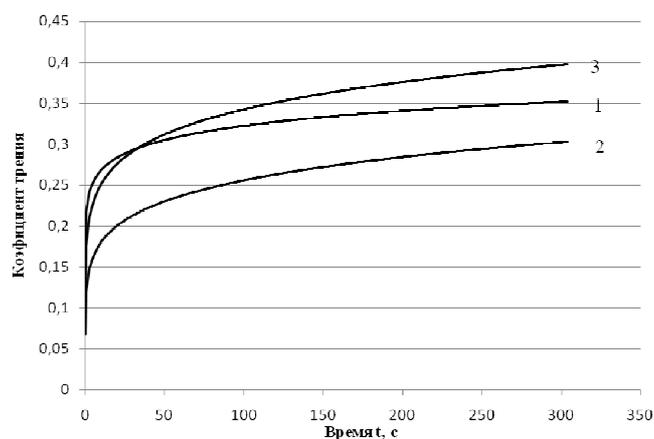
Рисунок 1 – Микрофотографии поверхности образцов при увеличении 20x

Исходное полиамидное покрытие характеризуется относительно однородным микрорельефом с шероховатой поверхностью (рисунок 1, а). Для модифицированных образцов характерно образование структурных волнообразных неоднородностей, распределенных по поверхности (рисунок 1, б, в).

Очевидно, что более темные области на образцах (рисунок 1, б, в) указывают на наличие твердых нерастворенных частиц (модификаторов) в покрытии.

Триботехнические испытания, предназначенные для исследования параметров трения и изнашивания материалов, проводили по схеме «сфера-плоскость» на микротрибометре FT-2 без смазочного материала с нагрузкой 20 Н [5].

Результаты триботехнических испытаний представлены на рисунке 2. Согласно проведенным триботехническим испытаниям установлено, что добавление модификаторов в исходный ПА 6 приводит к изменению значений коэффициентов трения.



1 – ПА 6; 2 – ПА 6 + ОМИАФ; 3 – ПА 6 + ОМИГФ  
Рисунок 2 – Результаты триботехнических испытаний

Уменьшение коэффициента трения на 15,5 % покрытия, модифицированного ОМИАФ, видимо, связано со снижением шероховатости поверхности трения, повышением площади фактического контакта и уменьшением удельной нагрузки в зоне контакта. Очевидно, что модификатор в полиамидном покрытии играет роль твердой смазки. Увеличение значения коэффициента трения на 6,8 % у образца, модифицированного ОМИГФ, связано с неоднородностью и низкой прирабатываемостью трущихся поверхностей. Стоит отметить, что в процессе испытания не происходило растрескивания и отслоения покрытий.

Как отмечалось ранее, физико-механические свойства композиционных покрытий (коррозионная стойкость, микротвердость и др.) являются важными характеристиками качества и обуславливают область их применения. Развитие техники требует необходимости разработки полимерных композиционных покрытий, обладающих высокими защитными свойствами. Создание покрытий на основе полиамидов является актуальным в настоящее время, так как они обладают повышенными физико-механическими свойствами, а

внедрение вещества второй фазы (модификатора) может оказать влияние на защитные свойства покрытий, в том числе и на коррозионную стойкость. Необходимо помнить, что степень коррозионного поражения зависит от агрессивности среды, качества защитных покрытий, сочетания материалов деталей в узле и других факторов.

Результаты коррозионных испытаний представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

С помощью оптической микроскопии на поверхности образцов обнаружено появление единичных коррозионных очагов темно-коричневого цвета (рисунок 3).

Оценка степени поражения проводилась в баллах в соответствии с ГОСТом 9.308-85 [5].

Таблица 1 – Результаты коррозионных испытаний

Образец	Степень поражения	Балл
Полиамид 6	6,8	4
Полиамид 6 + ОМИАФ	1,3	6
Полиамид 6 + ОМИГФ	0,7	7

Коррозионные испытания показали, что модификаторы оказывают положительное воздействие на коррозионную стойкость композиционных полиамидных покрытий. Наименьшее количество коррозионных образований было выявлено у полиамидного покрытия, модифицированного ОМИГФ.

Известно, что адгезия определяет прочность сцепления покрытия с подложкой на молекулярном уровне, а проведение испытаний позволяет установить степень прочности соединения двух различных поверхностей.

Результаты адгезионных испытаний представлены в таблице 2. Оценка адгезионной прочности покрытий проводилась в баллах в соответствии с ГОСТом 15140-78 [6].

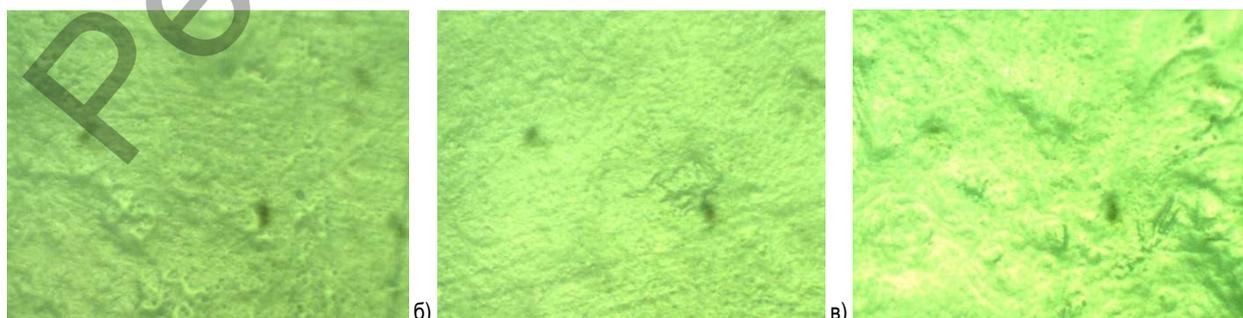
Таблица 2 – Результаты адгезионных испытаний

Образец	Балл
Полиамид 6	1
Полиамид 6 + ОМИАФ	2
Полиамид 6 + ОМИГФ	2

Из представленных данных видно, что адгезионная прочность модифицированных покрытий меньше, чем прочность исходного покрытия из ПА 6. Очевидно, что это обусловлено дефектностью покрытий на микроуровне, а также высоким атомарным объемом материала подложки.

**Заключение.** С помощью оптической микроскопии изучены морфологические характеристики поверхности композиционных покрытий на основе полиамида 6. Установлено, что исходное полиамидное покрытие характеризуется относительно однородным микрорельефом; для модифицированных образцов характерно образование структурных волнообразных неоднородностей, распределенных по поверхности. Очевидно, что более темные области на образцах указывают на наличие твердых нерастворенных частиц (модификаторов) в покрытии.

В результате триботехнических испытаний установлено, что использование модификатора олигоамлеимидоаминофенилена приводит к



а) – ПА 6; б) – ПА 6 + ОМИАФ; в) – ПА 6 + ОМИГФ

Рисунок 3 – Микрофотографии поверхности образцов после коррозионных испытаний при увеличении 40x

снижению коэффициента трения. Это объясняется попаданием индикатора трибометра FT-2 на частицы модификатора, которые выполняют роль «сухой смазки». Увеличение значения коэффициента трения на 6,8 % у образца, модифицированного ОМИГФ, связано с неоднородностью и низкой прирабатываемостью трущихся поверхностей.

При исследовании защитных свойств покрытий установлено, что очаги коррозии реже появляются на образцах с покрытием, где использовались модификаторы. Очевидно, это связано с благоприятным влиянием модификаторов на коррозионную защиту. Модифицированные композиционные покрытия, нанесенные непосредственно на поверхность стали, обеспечивает защиту от коррозии в среднем на 25–30 %.

Таким образом, экспериментально установлено, что введение модификаторов в полиамидное покрытие, в частности, олигоимидоаминофенилена и олигоимидоимидогидроксифенилена, приводит к изменению поверхностной структуры покрытий, улучшению триботехнических характеристик поверхности и повышению коррозионной стойкости деталей.

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения разработанных покрытий в машиностроении, в частности, для деталей узлов трения автотракторной техники и технологического оборудования.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зборщик, А. М. Конспект лекций по дисциплине «Новые материалы в металлургии» / А. М. Зборщик. – Донецк: ГВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 235 с.
2. Яковлев, А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов. – 4-е изд., исправл. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2010. – 448 с.
3. Имидосодержащая меламиналкидная композиция: пат. 15323 РБ, МПК C08L 61/28, C08L 67/08 / А. И. Глоба [и др.]; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» – № а 20101151, заявл. 28.07.2010; опубл. 28.02.12.
4. Гаврилова, В. В. Триботехнические и композиционные материалы / В. В. Гаврилова, А. С. Антонов, С. А. Плещак. – Гродно: ГрГУ, 2013. – Часть I: Триботехнические материалы. Лабораторный практикум – 48 с.
5. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний: ГОСТ 9.308-85. – Введен 28.11.85. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам. – 1987. – 21 с.
6. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии: ГОСТ 15140-78. – Введен 01.01.79. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 12 с.

Материал поступил в редакцию 08.11.2018

#### SHUPAN P. I., LESHCHIK S. D. SHAVIRIN P. D. Research of structure and properties composite polymeric coverings on the basis of polyamide 6

Polymer composite coatings based on polyamide 6 containing oligomaleimidoaminophenylene and oligomaleimidohydroxyphenylene are have been obtained. The morphological characteristics of the surface of the composite coatings based on polyamide 6 have been studied using the light-microscopical method. Tribotechnical tests have shown that the use of an oligomaleimidoaminophenylene modifier as a modifying agent leads to a decrease in friction coefficient; it has been noted that this oligoimide has the properties of a dry lubricant. Corrosion tests have shown that modified coatings are less susceptible to corrosion.

УДК 681.518:303.732:004.45:637.131

Заец Н. А., Власенко Л. О., Луцкая Н. Н., Штепа В. Н.

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**Введение.** Технологические комплексы (ТК) пищевых производств имеют сложную структуру и состоят из большого количества взаимосвязанных аппаратов, объединенных материальными, информационными, тепловыми и энергетическими потоками в отделения, цеха и производства [1].

В качестве примера приведен анализ молочного производства, особенностью которого является широкий ассортимент производимой продукции, разнообразие и количество видов которой может потребовать изменений в силу объективных факторов (изменения качества сырья, поступающего на предприятие, изменения спроса, состояния оборудования и т. п.) в условиях переработки быстропортящихся сырья и полуфабрикатов [2]. Для эффективной работы ТК молокозавода особое значение имеет определение узких мест и недопущение появления нештатных ситуаций и простоев. Это возможно только при своевременной и объективной информации о состоянии производства.

Технологический комплекс молочного завода относится к классу сложных систем, поскольку относится к предприятиям средней или

высокой мощности, является многофункциональным, разнородным, с комбинированной технологической топологией соединения элементов, с иерархической структурой, количество элементов превышает  $10^3$ . Кроме того, следует отметить, что производство можно разделить на подсистемы, соответствующие отдельному технологическому процессу или производству продукта. Поэтому ТК обладает определенной степенью автономности составляющих с возможностью управления ими на основании разных критериев оптимальности. Подсистемы при этом связаны сложными структурными и функциональными отношениями, что требует координации их работы между собой [3].

Для эффективной работы ТК молокозавода необходимо обеспечить следующие требования для каждой составляющей:

Сырье:

- обеспечение соответствующего качества исходного сырья;
- сохранение сырья со строгим соблюдением регламентированных условий: температурных, качественных (влажность, pH и т. д.) и других режимов;

**Заец Наталья Анатольевна**, к. т. н., доцент кафедры автоматизации и робототехнических систем им. акад. И.И. Мартыненко Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, доцент, e-mail: z-n@ukr.net.

Украина, 04300, г. Киев, ул. Героев Оборона 15, корпус 11.

**Власенко Лидия Александровна**, к. т. н., доцент кафедры интегрированных автоматизированных систем управления Национального университета пищевых технологий Украины, доцент, e-mail: lutskanm2017@gmail.com.

**Луцкая Наталья Николаевна**, к. т. н., доцент кафедры автоматизации и интеллектуальных систем Национального университета пищевых технологий Украины, доцент, e-mail: lutskanm2017@gmail.com.

Украина, 04300, г. Киев, ул. Владимирская, 68.

**Штепа Владимир Николаевич**, к. т. н., доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета а, доцент, e-mail: shns1981@gmail.com.

Беларусь, 225710, г. Пинск, ул. Днепровской Флотилии, 23.