

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ
НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ В ПРОЦЕССЕ ИНТЕГРАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ© 2019 Ю.С. Клочков¹, Е.А. Конников^{1,2}¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого² Санкт-Петербургский государственный экономический университет

Статья поступила в редакцию 11.12.2018

На сегодняшний день процесс перехода к новому технологическому укладу стал очевиден каждому. Данный переход особенно ощутим на промышленных рынках. Современное промышленное предприятие, не являющееся национальным монополистом и не имеющее доступа к уникальному природному ресурсу, вынуждено существовать в условиях гиперконкуренции. Следовательно, обеспечение долгосрочной конкурентоспособности промышленного предприятия лежит в области перехода к передовым производственным технологиям, производственным технологиям нового технологического уклада. Наиболее ярким проявлением таких технологий являются аддитивные технологии, процесс перехода к которым является предметом данного исследования. Целью данной работы является исследование изменений структуры производственной себестоимости промышленного предприятия при переходе к аддитивным технологиям.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, промышленное предприятие, производственная себестоимость, процесс конструирования, нечеткая логика.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность, прежде всего обрабатывающая, играет ключевую роль в развитии мировой экономики. В частности, промышленность, как правило, генерирует рабочие места с более высокой, чем в сельском хозяйстве, оплатой труда, что способствует структурным экономическим изменениям в странах с низкими доходами и их перемещению в категорию стран со средними, а иногда и высокими доходами. [1]. Если анализировать динамику мирового валового продукта по основным секторам (сельское хозяйство, промышленность, услуги) [2] то можно заметить, что с 1970 по 2000 гг. сектор услуг рос более быстрыми темпами, чем промышленность (до 4,5% в год), однако начиная с 2000 г. годовой рост всех трех секторов сравнялся и стабилизировался примерно на уровне 2,5%.

В стоимости мировой промышленной продукции 9/10 приходится на обрабатывающую промышленность. Для развитых стран характерен еще более высокий ее удельный вес [3]. Мож-

но выделить следующие мировые тенденции развития обрабатывающей промышленности:

1. Начиная с 60-х гг. 20 века мировая промышленность взяла курс на деиндустриализацию (снижение доли промышленности в мировом валовом продукте). В общемировом масштабе доля добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в ВВП за период с 1962 по 2012 гг. упала с 20,9% до 12,3%.

2. Если смотреть статистику географического распределения добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в мире за последние три десятилетия (автором используются данные за 1990 и 2014 гг. [4]), то можно увидеть, что доля стран Северной Америки упала с 23% до 20,9%, Западной Европы – с 40,7 до 27,5%, а стран Азиатско-Тихоокеанского региона возросла с 27,8% до 44,5%.

3. Наблюдается тенденция повышения эффективности обрабатывающей промышленности благодаря сокращению занятости и удельного энергопотребления, в основном, за счет промышленно развитых стран.

Таким образом, мировая промышленность на сегодняшний день может характеризоваться высоким уровнем конкуренции, как на уровне стран, так и на уровне конкретных предприятий. При этом, существующие технологические системы достигают оптимизационного пика, что, в условиях конкурентной среды, порождает необходимость их качественного изменения. Процесс кардинальной модернизации подразу-

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, директор центра мониторинга науки и образования. E-mail: klochkov_yus@spbstu.ru

Конников Евгений Александрович, старший преподаватель высшей инженерно-экономической школы СПбПУ, аспирант кафедры экономики и управления предприятиями и производственными комплексами СПбГЭУ. E-mail: konnikov_ea@spbstu.ru

мекает изменение одной из следующих элементов производственного процесса:

- оборотных ресурсов, в частности интеграция новых материалов, с целью получения новых свойств конечного продукта, и/или получения принципиально нового продукта и/или снижение производственных издержек;

- технологий производства, что, как правило, выражается в интеграции нового производственного оборудования.

Одним из наиболее передовых направлений развития производственного процесса практически всех отраслей обрабатывающей промышленности является интеграция аддитивных технологий. Аддитивные технологии – это обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления материала [5]. Данные технологии способны в корне изменить производственный процесс.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день, проблема интеграции аддитивных технологий в реальный сектор экономики, ровно также, как и последствия данной интеграции является широко обсуждаемой проблемой. На рисунке 1 представлена мировая публикационная активность по данным ScienceDirect. Рассмотрены публикации по рубрикам «Economics, Econometrics and Finance», а также «Business, Management and Accounting», содержащие в своих названиях словосочетания «Additive technologies» или «3D printing».

Дуглас Р. Гресса (Douglas R. Gressa) и Рональд В. Калафски (Ronald V. Kalafsky) в своей статье «География 3D производства: теоретические и науч-

исследовательские последствия развития аддитивного производства» (Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing) утверждают, что аддитивные технологии могут изменить географию производства в целом. Авторы утверждают, что аддитивные технологии окажут значительное влияние на структуру спроса и потребления, а также на инновации и глобальные цепочки поставок [6].

Более глобально вопрос перспектив аддитивного производства раскрывается в статье Каталины Коцмеи (Cătălina Cozmei) и Флорентина Калояна (Florentin Caloian) «Мерцание аддитивного производства в начале своего существования» (Additive manufacturing flickering at the beginning of existence). Авторы рассматривают аддитивное производство как новый, революционный этап в мировом производстве. В качестве экономических преимуществ аддитивных технологий рассматриваются: снижение постоянных расходов; отсутствие расходов на дополнительное оборудование, а, следовательно, и амортизационных расходов, связанных с дополнительным оборудованием; снижение рисков и уменьшение управленческих расходов. Также, Авторы подробно рассматривают вопросы, связанные с фискальной нагрузкой на предприятия, применяющие аддитивные технологии, и приходят к выводу, что развитие аддитивных технологий неизменно приведёт к глобальной модернизации системы налогообложения, так как на данный момент она не в состоянии взимать налоги с данных предприятий в связи с инновационным характером деятельности [7].

Кристиан Веллер (Christian Weller), Робин Клир (Robin Kleer) и Фрэнк Т. Пилер (Frank T. Piller) в своей статье «Экономические послед-

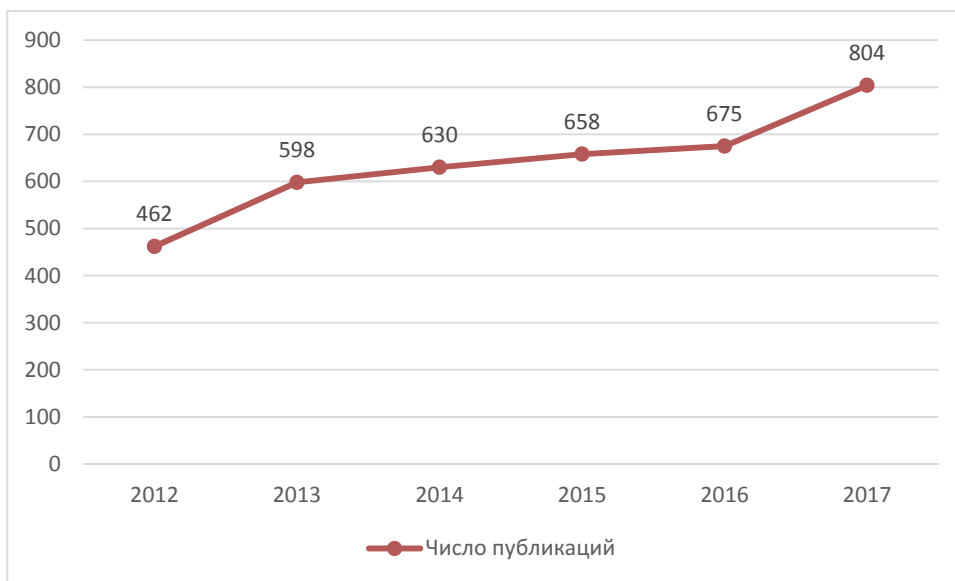


Рис. 1. Число публикаций в ScienceDirect

ствия 3D-печати: модели рыночной структуры в свете развития аддитивных технологий» (Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited) утверждают, что аддитивное производство в настоящее время позиционируется как источник новой промышленной революции. Данная технология дает возможность производить уникальные изделия без применения специализированных инструментов. Кроме того, аддитивное производство позволяет производить сложные конструкции в одну операцию, тем самым потенциально снижая потребность в монтажных работах. Авторы полагают, что в условиях монополии, применение аддитивных технологий позволит увеличить прибыль предприятия за счет использования потребительских излишков, благодаря построению гибкой производственной системы, подразумевающей производство индивидуальных заказов. В то же время будет стимулироваться конкуренция, так как аддитивные технологии снизят барьеры для выхода на рынок и дадут возможность функционировать на нескольких рынках одновременно. Результатом должно стать снижение цен для конечных потребителей [8].

Наиболее глубокое исследование в области экономики аддитивного производства осуществили Малте Геблер (Malte Gebler), Антон Дж.М. Шут Уитеркам (Anton J.M. Schoot Uiterkamp) и Синди Виссер (Cindy Visser). В своей статье «Перспективы глобальной устойчивости технологий 3D-печати» (A global sustainability perspective on 3D printing technologies) Авторы утверждают, что наибольшее развитие аддитивных технологий будет в сфере мелкосерийного производства, производства уникальных товаров и в области производства дорогостоящего оборудования. В качестве наиболее перспективных отраслей выделяются аэрокосмическое и медицинское производство. Также Авторы первыми рассматривают изменение структуры затрат на производство изделия при применении 3D-печати. Расходы на оборудование при аддитивном производстве будут составлять 45-75% от себестоимости продукции. Затраты на сырье варьируются в зависимости от конкретных условий производства, однако в среднем составляют всего 12% от себестоимости производства. Цены на сырье для 3D-печати значительно выше, чем на сырье при классических способах производства, однако при этом КПД материала значительно выше. Себестоимость продукции может быть снижена, так как аддитивные технологии позволяют создавать более легкие конструкции со сложной геометрией. Авторы утверждают, что данный факт обеспечит экономию топлива, например, в авиации, где каждый лишний килограмм увеличивает расходы керосина на 3000\$ [9, 10].

Стивен Меллор (Stephen Mellor), Лян Хао (Liang Hao) и Дэвид Чжан (David Zhang) в своей статье «Аддитивное производство: условия реализации» (Additive manufacturing: A framework for implementation) отмечают, что до недавнего времени аддитивные технологии использовались исключительно в области прототипирования. Однако в условиях современных реалий стало возможным создание полноценных производств, основанных на аддитивных технологиях. В качестве преимуществ данной технологии Авторами выделяются практически неограниченные возможности в области дизайна конечного изделия; отсутствие необходимости в специализированной оснастке и низкие издержки [11].

Существующие научные исследования в данной области сосредотачиваются либо на глобальном аспекте развития аддитивного производства, не рассматривая специфики изменения производственных процессов, либо на частных случаях интеграции аддитивных технологий в конкретные технологические процессы. В рамках данной статьи авторы детально исследуют вопрос изменения цепочек создания ценности и изменение структуры себестоимости производства при интеграции аддитивных технологий в производство. В качестве объекта исследования берется машиностроение. Данный выбор обусловлен тем, что на данный момент подавляющее большинство коммерческих разработок в области аддитивных технологий в первую очередь ориентированы именно на машиностроение. На данный момент аддитивные технологии могут прийти на смену классическим способам формообразования, таким как механическая обработка посредством ЧПУ оборудования.

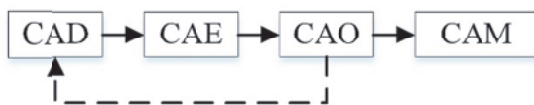
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первую очередь рассмотрим изменение процесса конструирования при переходе с CNC технологий к аддитивным (рисунок 2).

Как мы можем видеть, из процесса конструирования полностью исключается этап обработки технологичности. Это обусловлено тем, что принцип формообразования аддитивных технологий предполагает получение практически любой формы послойно. Программно-аппаратные средства способны выстроить процесс получения формы без вмешательства человека [12]. Данный факт позволяет полностью отказаться от такой штатной единицы, как технолог, что во многом сократит себестоимость конечного изделия.

Следующим после этапа конструирования значительным изменениям подвергнется этап производства. Так как процесс производства

Процесс конструирования с использованием CNC технологий



Процесс конструирования с использованием Аддитивных технологий



Рис. 2. Процесс конструирования при CNC и Аддитивных технологиях

практически невозможно универсализировать со структурной точки зрения, изменения проще все будет представить через модель формирования производственной себестоимости. В укрупненном виде процесс формирования производственной себестоимости можно представить посредством следующей аддитивной модели:

$$P = P_3 + P_{зп} + P_{об}, \quad (1)$$

где P_3 – совокупная стоимость материалов;
 $P_{зп}$ – затраты по оплате труда персонала;
 $P_{об}$ – затраты на эксплуатацию оборудования.

Как можно видеть, каждый из представленных элементов модели подвергнется изменением, так как аддитивные технологии предполагают принципиально иной материал. Более того, данный материал обладает значительно большей возвратностью отходов производства, что также обусловлено принципом формообразования. В данном случае возвратность отходов практически идентично применению технологий литья. Сами аддитивные установки также имеют свою специфику, что безусловно сказывается на стоимости их эксплуатации. Структура затрат на оплату труда также изменится, так как процесс управления аддитивной установкой значительно менее трудоемкий, чем процесс управления CNC установкой. Более детально описанные структурные изменения можно увидеть в изменении расширенной аддитивной модели формирования производственной себестоимости:

$$P = \frac{P_M}{n} + \frac{T_o + T_b + T_{об} + T_{от} + \frac{1-p-3}{n}}{60} \times P_{ч} + \frac{(W \times K_m \times T_{ш-к} \times C_{кв})}{КПД_{э.д.с.}} + \sum P_{и-к} \times \frac{T_{раб}}{T_{норм}} + \frac{P_{а-г} \times T_{ш-к}}{T_{г-с}} + \frac{P_{а-о} \times T_{ш-к}}{T_{г-о}} + \frac{P_{сож} \times T_{ш-к}}{T_{г-сож}} + \frac{S_{ст.} \times P_{ар.}}{S_{цех}} \times \frac{T_{ш-к}}{T_{р-мес}} \quad (2)$$

где: P_M – совокупная цена всего приобретенного материала (включая затраты на транспортировку и т.д.);

n – количество изделий изготавливаемых из данной партии материала;

$T_{ш-к}$ – штучно-калькуляционное время (время, затрачиваемое на производство 1 детали);

$P_{ч}$ – стоимость часа работы оператора станка или наладчика станка (в условном примере предположим, что это один человек);

T_o – основное время (время, затрачиваемое станком на обработку детали);

T_b – вспомогательное время, включающее в себя: время на установку и снятие детали, время на открепление и закрепление детали, время на приемы и управление, время на измерение;

$T_{об}$ – время на обслуживание (процент от суммы основного и вспомогательного времени);

$T_{от}$ – время на отдых и личные надобности (процент от суммы основного и вспомогательного времени);

$T_{п-з}$ – время на подготовку и заключение;

W – мощность станка;

K_m – коэффициент загрузки электродвигателя по мощности;

$C_{кв}$ – цена киловатт/час;

$КПД_{э.д.с.}$ – КПД электродвигателя станка;

$P_{и-к}$ – цена приобретения каждого используемого в процессе изготовления детали инструмента;

$T_{раб}$ – время работы каждого используемого инструмента;

$T_{норм}$ – допустимое время эксплуатации инструмента до момента полной непригодности (может использоваться произведения времен до момента заточки и количества допустимых заточек);

$P_{а-г}$ – стоимость годовой амортизации станка;

$T_{г-с}$ – предполагаемое количество рабочего времени станка в год (в минутах);

$P_{а-о}$ – стоимость годовой амортизации оборудования;

$T_{г-о}$ – предполагаемое количество рабочего времени оборудования в год (в минутах);
 $P_{сож}$ – цена необходимой СОЖ;
 $T_{г-сож}$ – предполагаемое количество рабочего времени СОЖ до замены (в минутах);
 $P_{пом}$ – расходы по аренде помещения;
 $S_{ст.}$ – площадь занимаемая станком;
 $P_{ар}$ – величина аренды цеха в месяц;
 $S_{цех}$ – площадь арендуемого цеха;
 $T_{р-мес}$ – время предполагаемой работы станка в месяц (в минутах).

Рассмотрим отдельные элементы данной модели. Стоимость материала (P_m) складывается из стоимости его приобретения ($P_{м1}$), логистических расходов ($P_{м2}$), стоимости дополнительной обработки ($P_{м3}$) и невозвратность отходов и брака ($P_{м4}$). Промышленные аддитивные установки предполагают использование специализированных материалов порошкового типа, стоимость которых значительно превышает стоимость классических материалов. Данный факт обусловлен недостаточным объемом мирового производства. Ситуация с промышленными расходами при этом неоднозначная, так как с одной стороны процесс хранения и транспортировки значительно упрощается за счет большей вариативности транспортируемого объема, но с другой стороны производителей данных материалов в мире достаточно немного. При этом стоимость дополнительной обработки значительно ниже, так как отсутствует необходимость в предварительной подготовке материала и формировании заготовок. Невозвратность отходов и брака значительно ниже чем у классических способов формообразования. Фактически возвратность отходов и брака может достигать 100%. Таким образом мы получаем следующее соотношение показателей:

$$\begin{cases} P_{м1-аддитивные технологии} \geq P_{м1-CNC технологии} \\ P_{м2-аддитивные технологии} \approx P_{м2-CNC технологии} \\ P_{м3-аддитивные технологии} \leq P_{м3-CNC технологии} \\ P_{м4-аддитивные технологии} \leq P_{м4-CNC технологии} \end{cases}$$

При общих изменениях в соотношениях между элементами расходов на материал, состав данных расходов не изменился. Расходы на оплату труда изменились незначительно с точки зрения состава и структуры. Основное время является исключительно вариативным показателем, и непригодным для сравнения. Вспомогательное время в случае аддитивных технологий будет значительно ниже, так как процесс производства более автоматизирован. Время на обслуживание, время на отдых и личные надобности, а также время на подготовку и заключение остаются практически неизменными. Таким образом мы получаем следующее соотношение показателей:

$$\begin{cases} T_{о-аддитивные технологии} \approx T_{о-CNC технологии} \\ T_{в-аддитивные технологии} \leq T_{в-CNC технологии} \\ T_{об-аддитивные технологии} \approx T_{об-CNC технологии} \\ T_{от-аддитивные технологии} \approx T_{от-CNC технологии} \\ T_{п-з-аддитивные технологии} \approx T_{п-з-CNC технологии} \end{cases}$$

Способ расчета затрат на электроэнергию ($P_{эл}$) сохраняет основной механизм, однако коэффициент загрузки электродвигателя по мощности и КПД электродвигателя станка замещаются альтернативными показателями для аддитивной установки. Энергопотребление современных аддитивных установок сопоставимо с энергопотреблением CNC оборудования:

$$P_{эл-аддитивные технологии} \approx P_{эл-CNC технологии}$$

Статьи затрат, связанные с расходом материала и плановой заменой СОЖ полностью исключаются, и заменяются на альтернативные показатели износа конструктивных элементов аддитивной установки ($P_{ад}$) (к примеру экструдера). Так как данные элементы значительно более унифицированы и износостойки, следует предполагать меньшие затраты:

$$P_{сож} + P_{и-к} \geq P_{ад}$$

Стоимость годовой амортизации аддитивной установки ($P_{а-ад}$), на данный момент будет значительно выше, так как ее стоимость значительно превышает стоимость альтернативного CNC оборудования, даже несмотря на необходимость приобретения вспомогательного оборудования:

$$P_{а-г} + P_{а-о} \leq P_{а-ад}$$

Иные элементы модели остаются неизменными. Видим, что изменение состава и структуры себестоимости производства является достаточно неоднозначным. Снижения расходов на материал предприятие может достигнуть только при условии значительного процента брака и производственных отходов [13]. Снижения расходов на оплату труда предприятие может достигнуть только при условии сокращения основного времени производства, что возможно только в случае геометрически сложных и невозможных для изготовления на CNC оборудовании изделий. Снижения расходов на оборудование предприятие может достигнуть исключительно при большем полезном сроке использования аддитивной установки. Таким образом, можно заключить, что принятие решения об интеграции аддитивных технологий на коммерческие промышленные предприятия является комплексным и неоднозначным. Данное решение зависит от множества факторов, а результат подвержен высокому уровню неопределенности. Следовательно, вопрос формирования инструмента оценки инвестиционной привлекательности подобного перехода является чрезвычайно актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи был подробно рассмотрен вопрос изменения состава и структуры себестоимости производства изделий на промышленном предприятии при интеграции аддитивных технологий. Было установлено, что переход на аддитивные установки позволит отказать от штатной единицы – инженера-технолога, что значительно скажется на себестоимости конструирования изделий. В тоже время себестоимость производства изделий может измениться неоднозначно. В связи с этим в рамках дальнейших исследований предлагается разработать модель оценки уровня инвестиционной привлекательности интеграции аддитивных технологий в производственный процесс промышленного предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Industrial development report 2016: the role of technology and innovation in inclusive and sustainable industrial development. 2015. Vienna: United Nations Industrial Development Organization. P. 33.
2. Статистический сборник ЮНКТАД (Конференция ООН по торговле и развитию). URL: www.unctadstat.unctad.org/wds/TableView/summary.aspx (дата обращения 16.11.2018).
3. Лыгина Н.И., Рудакова О.В., Марченкова Л.М. Российская промышленность в мировых рейтингах конкурентоспособности // Актуальные аспекты фундаментальных и прикладных исследований: сборник научных трудов [под общ. ред. И.Г. Паршутиной]. Орёл: Изд-во ОрелГИЭТ, 2016. С.96-108.
4. Industrial development report 2016: the role of technology and innovation in inclusive and sustainable industrial development. 2015. Vienna: UNIDO.
5. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении // Изд. СПбПУ, 2013. С. 5.
6. Douglas R. Gressa, Ronald V. Kalafsky. Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing // Geoforum, March 2015;
7. Cătălina Cozmei, Florentin Caloian. Additive manufacturing flickering at the beginning of existence // Procedia Economics and Finance. №3. 2012.
8. Christian Weller, Robin Kleer, Frank T. Piller. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited // International Journal of Production Economics, June 2015.
9. Malte Gebler, Anton J.M. Schoot Uiterkamp, Cindy Visser. A global sustainability perspective on 3D printing technologies // Energy Policy, November 2014.
10. Wittbrodt B.T., Glover A.G., Laureto J., Anzalone G.C., Oppliger D., Irwin J.L., Pearce J.M. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers // Mechatronics, 2013.
11. Stephen Mellor, Liang Hao, David Zhang. Additive manufacturing: A framework for implementation // International Journal of Production Economics, March 2014.
12. Курочкина А.Ю., Голубцов С.Б., Погребова О.А. Интернет-маркетинг: Учебное пособие. СПб, 2016.
13. Устойчивый маркетинг: теория и практика устойчивого потребления / О.У. Юлдашева, Ю.Н. Соловьева, О.А. Погребова, Е.В. Халина, О.И. Ширшова. Монография. СПб, 2017.

CHANGES IN THE STRUCTURE OF PRODUCTION COSTS AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE WHILE INTEGRATING ADDITIVE TECHNOLOGIES

© 2019 Y.S. Klochkov¹, E.A. Konnikov^{1,2}

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

²Saint Petersburg State University of Economics

Today the process of transition to a new technological mode has become evident. This transition is particularly noticeable in industrial markets. A modern industrial enterprise that is not a national monopoly and does not have access to a unique natural resource is forced to exist in conditions of hypercompetition. Ensuring the long-term competitiveness of an industrial enterprise lies in the area of transition to advanced production technologies of a new technological order. The most striking manifestation of such technologies are additive technologies, the process of transition to which is the subject of this study. The purpose of this paper is to study the changes in the structure of production cost of an industrial enterprise while transition to additive technologies.

Keywords: Additive technologies, industrial enterprise, production cost, design process, fuzzy logic.

Yury Klochkov, Doctor of Technics, Associate Professor, Director of the Center for Monitoring Science and Education. E-mail: klochkov_yus@spbstu.ru

Evgenii Konnikov, Senior Lecturer of Graduate School of Economics and Technologies SPbPU, Postgraduate Student of Economics and Management of Enterprises and Industrial Complexes Department. E-mail: konnikov_ea@spbstu.ru