

А. А. Мадых
канд. экон. наук
0000-0002-2197-7860,

А. А. Охтень
канд. экон. наук
0000-0003-1629-3891,

А. Ф. Дасив
канд. экон. наук
0000-0001-5431-701X,

Институт экономики промышленности НАН Украины, г. Киев

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАРТ-ПРЕДПРИЯТИЙ: МИРОВОЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Постановка проблемы. В 2011 году на Ганноверской выставке-ярмарке группой германских исследователей, бизнесменов и общественных деятелей, входящих в научно-исследовательский альянс по разработке стратегических принципов высокотехнологичного производства, был предложен термин «Промышленность 4.0» и ее принципы [17]. Это событие ознаменовало осмысление и начало перехода к новой индустриальной революции, основанной на повсеместном применении «умных» технологий, способных полностью исключить человека из процесса принятия рутинных решений в сфере производства.

Распространение информационных технологий, тотальная автоматизация самых разнообразных процессов, открытие принципиально новых материалов и безотходных способов их использования, успехи в создании кибер-физических систем, обладающих искусственным интеллектом – все это стало предпосылками для осознания новых, революционных возможностей в организации промышленного производства [4, 14]. Страны с эмерджентной экономикой (включая страны бывшего СССР, такие как Россия, Украина и Беларусь), промышленность которых использует преимущественно технологии 3-го и 4-го технологических укладов [1, 3, 5], сильно отстали в своем развитии от Западных стран, и возможности эволюционно догнать их выглядят сомнительно. Тем не менее, они не имеют права оставаться в стороне от этих важнейших трансформаций. Преобразование существующих и создание новых предприятий на основе технологий 6-го уклада способно позволить им занять достойную нишу в новом международном разделении труда цифрового будущего.

Однако, любой, даже локальный, проект требует тщательного обоснования своей целесообразности: затраты на создание таких предприятий должны быть оправданы, а эффективность их деятельности превышать текущую эффективность. Переход к новой смарт-системе производства и мероприятия по трансформации производственных отношений должны тщательно обосновываться, а наиболее эффективным инструментом описания проектируемых систем и процессов является инструментарий экономико-математического моделирования, позволяющий проводить эксперименты с проектируемой системой, изучать ее свойства, оценивать эффективность, предвосхищать возникновение проблем и ошибок без риска понести

колоссальные потери, неизбежные в случае проведения экспериментов с реальной системой.

Аппарат экономико-математического моделирования в настоящее время достаточно хорошо разработан для описания любых, даже самых сложных процессов и систем, однако, новизна решаемых задач при создании смарт-предприятий не позволяет сделать однозначный выбор в пользу применения каких-то определенных инструментов, в связи с чем целесообразно изучение зарубежного опыта применения этих методов при создании смарт-предприятий, поскольку у развитых стран в данном вопросе уже есть определенные эмпирические знания.

Поэтому *целью данной статьи* является изучение зарубежного опыта экономико-математического моделирования смарт-предприятий и обоснование возможности его использования в условиях стран с эмерджентной экономикой, включая страны бывшего СССР.

Можно выделить следующие понятия, связанные с данной цифровой революцией, обладающие определенной синонимичностью:

– «*четвертая промышленная революция*» [21], практическими проявлениями которой является интенсификация информационного обмена в производстве, Интернет вещей, кибер-физические системы и облачные вычисления [32];

– «*промышленность 4.0*» (нем. Industrie 4.0), которой в Германии обозначается четвертая промышленная революция [26];

– «*умная фабрика*» или «*смарт-предприятие*» – модульные, структурированные фабрики, в которых кибер-физические системы контролируют физические процессы, создают виртуальную копию физического мира и принимают децентрализованные решения [29];

– «*кибер-физические системы*» (CPS) – аппаратно-программные системы, представляющие собой тесное переплетение физического и виртуального мира. Такие системы создаются из сетевых встраиваемых систем, связанных с внешним миром с помощью датчиков и приводов, получающая потоки данных из физического мира и создавая и постоянно обновляя виртуального двойника физического мира [24, 38];

– «*Интернет вещей*» [18] (IoT) – информационные сети физических объектов (предметов, товаров, машин, автомобилей, зданий и других объектов), ко-

которые обеспечивают взаимодействие и сотрудничество этих объектов для достижения общих целей;

– «Промышленный интернет вещей» [30] (IIoT) – информационная сеть, которая также включает среди прочего, транспорт и промышленные производства (цифровые представления продуктов, кибер-физические системы умных фабрик и т.д.).

Для анализа экономико-математических моделей смарт-предприятий, необходимо классифицировать все многообразие публикаций, посвященных проблемам их внедрения и функционирования, и выделить те области, изучение которых целесообразно в рамках исследования по идентификации направлений становления смарт-промышленности.

При этом *по объектам исследования* можно выделить три направления таких публикаций:

1) технико-технологическое направление, связанное с проектированием и внедрением высокотехнологических физических систем;

2) информационное направление, связанное с накоплением, обработкой и передачей информации;

3) экономическое направление, связанное с изменениями в обеспечении благами и учетом экономических интересов отдельных людей и социальных групп.

Подробнее можно выделить следующие объекты изучения, рассматриваемые по данным направлениям (рис. 1).

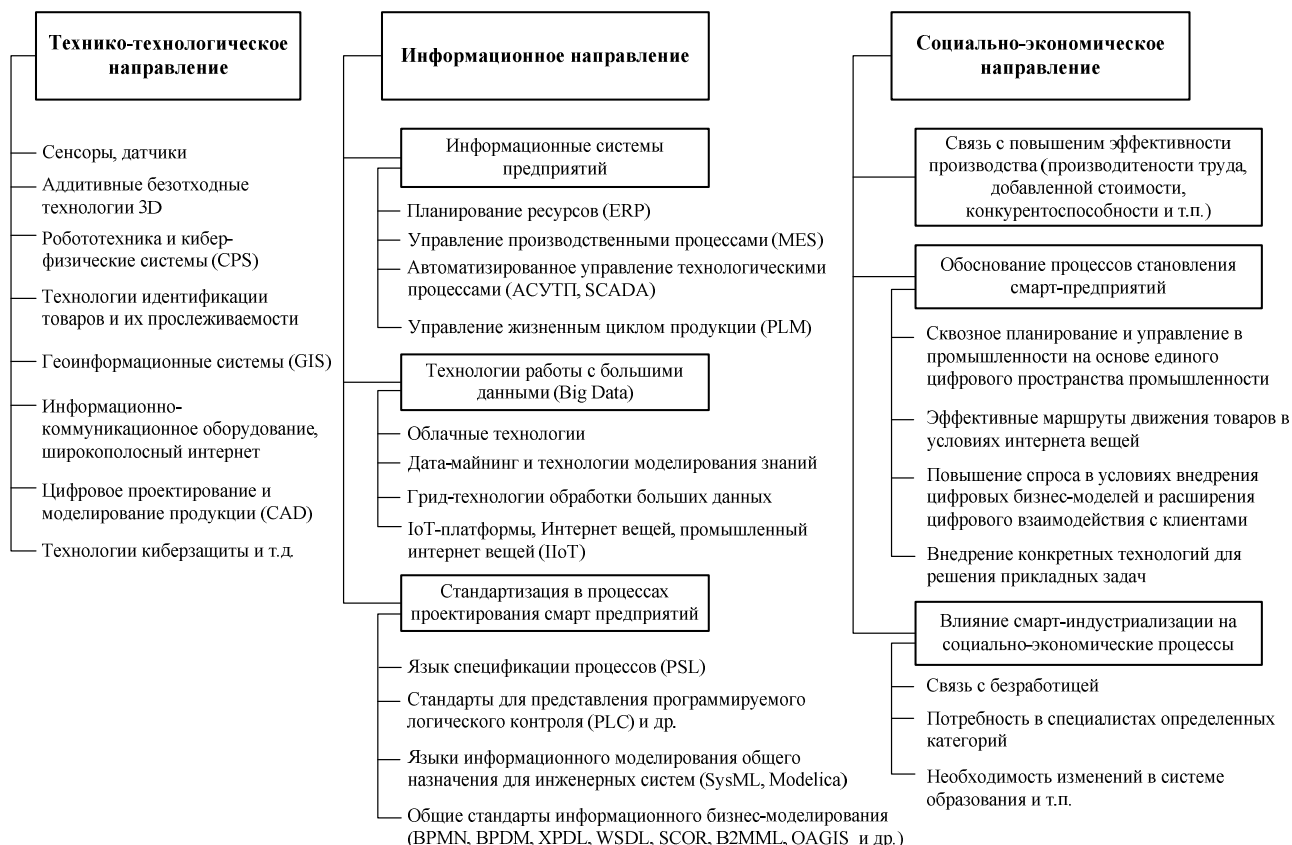


Рис. 1. Основная объектная направленность публикаций, посвященных исследованию смарт-промышленности

Также все разнообразие публикаций, посвященных смарт-предприятиям, в зависимости от целей, которые в данной публикации преследуются, можно разделить *по решаемым задачам*:

1. *Описательно-ознакомительные* – целью которых является первичное ознакомление читателя с теми или иными объектами или явлениями в смарт-индустриализации. Такие публикации не имеют отношения к экономико-математическому моделированию, но знакомство с сущностью данных объектов и явлений позволяет идентифицировать проблемы, решение которых возможно с применением данного методологического аппарата.

2. *Инженерные* – целью которых является описание процессов. В данных публикациях в больших количествах встречаются описания различных моделей, в том числе и математических, но эти модели носят инженерный характер и никаких экономических за-

дач, как таковых они не решают. Однако, как и в предыдущем случае, их анализ позволяет идентифицировать и возникновение сопутствующих экономических задач.

3. *Экономически аргументирующие* публикации, в которых подтверждается экономическая целесообразность внедрения тех или иных процессов, связанных со смарт-индустриализацией, или же обосновывается возникновение новых задач, носящих экономико-социальную проблематику. Такие публикации непосредственно относятся к предмету данного исследования, однако отличаются немногочисленностью, несистемностью и непроработанностью затрагиваемых в них проблем.

Публикации второй и третьей группы, как правило, включают себя и описательно-ознакомительную часть и таким образом могут пересекаться с публикациями первой группы. Однако, пересечений публика-

ций второй и третьей группы, которые бы рассматривали проблематику инженерного проектирования smart-предприятий через призму решения экономических задач – не обнаружилось.

Связь характера публикаций по решаемым ими задачам с их направлениями по объектам исследования показана на рис. 2.

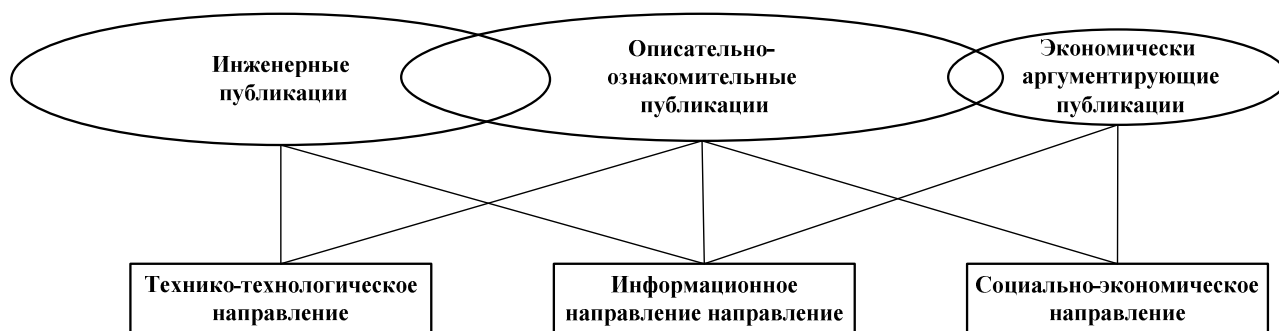


Рис. 2. Связь характера публикаций по решаемым ими задачам с их направлениями по объектам исследования

Обзор публикаций, посвященных smart-предприятиям, начнем с *описательно-ознакомительных* работ, направленных на идентификацию признаков таких предприятий и принципов их функционирования, поскольку эти публикации формируют базовое представление о модели функционирования таких предприятий.

Согласно [27] выделяют 4 принципа проектирования «Промышленности 4.0»:

- *взаимодействие*: способность машин, устройств, датчиков и людей подключаться и взаимодействовать друг с другом через «Интернет вещей» или «Интернет людей»;

- *информационная прозрачность*: способность информационных систем создавать виртуальную копию физического мира путем наполнения цифровых моделей предприятий данными датчиков;

- *техническая помощь*: во-первых, это способность систем поддержки помогать людям путем агрегирования и визуализации информации для принятия обоснованных решений и быстрого решения проблем; во-вторых, способность кибер-физических систем физически поддерживать людей, выполняя ряд задач, которые являются неприятными, изнурительными или опасными для людей;

- *децентрализованные решения*: способность кибер-физических систем самостоятельно принимать решения и выполнять свои задачи как можно более автономно.

В работе [29] выделяются три сферы «умного предприятия», которые отличают их от традиционных предприятий:

1. *Мониторинг и управление* – системы мониторинга и управления, внедренные на умных предприятиях, в реальном времени собирают и передают широкий спектр данных о состоянии объектов предприятия, их работе, использовании ресурсов, и состоянии окружающей их среды, что позволяет оперативно реагировать на изменения.

2. *Обмен информацией и взаимодействие* – современная информационная инфраструктура позволяет осуществлять обмен большими объемами информации между людьми, людьми и физическими объектами, а также между физическими объектами без вмешательства людей.

3. *Большие данные и анализ данных* – сбор больших объемов данных о состоянии объектов, процессов и внешней среды, а также увеличение мощности систем обработки данных позволяют расширить применение аналитических средств для улучшения бизнес-процессов на всех стадиях, включая разработку, производство и реализацию продукции.

Исходя из этого, критериями причисления предприятия к числу smart-предприятий можно назвать: использование им интеллектуальных датчиков для мониторинга и управления процессами; автоматизация процессов обмена информацией и взаимодействия работников друг с другом, работников с физическими объектами (преимущественно машинами и компьютерными системами), а также физических объектов друг с другом; использование больших данных для непрерывного анализа и совершенствования процессов.

Таким образом, ключевым фактором в моделировании smart-предприятий становится работа с большими данными, исследованию которых посвящено большое количество работ, связанных со smart-индустриализацией.

Работа с большими данными (англ. «big data»), которые наряду с программным обеспечением кибер-физических систем составляют основу информационного обеспечения smart-промышленности, связана с существенными сложностями при их обработке традиционными способами. Эта сложность объясняется не только большим объемом данных, но и их неструктурированностью, отсутствием централизации сбора и обработки, а также слабой взаимосвязью между самими данными. В работе [34] большие данные определяются как наборы данных, размер которых выходит за пределы возможностей типичных программных средств управления базами данных по сбору, хранению, управлению и анализу.

В обзорной работе азиатских авторов [28] проанализирован жизненный цикл больших данных, состоящий из четырех этапов (генерирования, сбора, хранения и анализа), и рассмотрены основные подходы и инструменты, которые могут использоваться на каждом этапе. Анализ больших данных с целью получения практических выводов непосредственно связан с технологиями дата-майнинга (англ. Data Mining – добыча данных). *Дата-майнинг* – собирательное название, используемое для обозначения совокупности методов

обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности [12].

Авторы работ [42, 33] выделяют следующие основные направления развития больших данных и сферы применения больших данных в промышленности:

- новые и усовершенствованные методы анализа больших данных и дата-майнинга;
- облачные решения, связанные с хранением и передачей больших данных;
- использование больших данных в контроле и мониторинге;
- основанная на больших данных оптимизация и прогнозирование в масштабе производственных систем;
- основанные на больших данных решения для развития цепочки поставок и управления рисками;
- использование теории больших данных в современных промышленных применениях;
- основанные на больших данных решения для интеллектуальных сетей передачи электроэнергии и экологически чистых энергетических систем.

В рамках внедрения дата-майнинга в управление производством авторы работы [25] предлагают платформу углубленной производственной аналитики (англ. Advanced Manufacturing Analytics), включающую три уровня:

1. *Оптимизация процессов* – включает в себя использование аналитических выводов, полученных на уровне 2 для совершенствования производственных процессов.

2. *Анализ процессов* – включает в себя различные способы обработки данных, собранных на уровне 3, включая дата-майнинг. Полученные результаты хранятся в репозитории производственной аналитики.

3. *Интеграция данных* – включает в себя хранилище производственных данных, в котором отражаются все данные, полученные в ходе производства продукции (все аспекты производственного процесса).

В качестве инструментария анализа данных предлагается использовать стандартные модели и методы, такие как *нейронные сети, опорные векторы, деревья решений, байесовские классификации и создание правил принятия решений*. Основным преимуществом предложенного подхода является выделение уровней системы использования больших данных при совершенствовании производственных процессов и акцент на необходимости создания репозитория производственной аналитики. В качестве недостатков можно выделить отсутствие конкретных моделей или авторских способов поддержки принятия решений.

В работе [35] рассматривается применение больших данных в производстве и делается вывод о том, что данные стали важным фактором производства наряду с материальными активами и человеческим капиталом, а большие данные позволяют компаниям создавать новые и улучшать существующие продукты и услуги, а также изобретать совершенно новые бизнес-модели.

В работе института McKinsey Global Institute выделяются следующие механизмы, посредством которых большие данные создают экономический эффект [34, с. 5]:

– *обеспечение прозрачности* и своевременного доступа к большим данным для соответствующих лиц, принимающих решения;

– *возможность проводить эксперименты* для выявления потребностей, анализа изменчивости и повышения производительности;

– *сегментация клиентов* и индивидуальные решения;

– *замена/поддержка принятия решений людьми* с помощью автоматизированных алгоритмов;

– *разработка новых бизнес-моделей, продукции и услуг*.

Общим выводом является то, что использование больших данных в ближайшее время станет ключевым фактором конкурентоспособности во всех сферах экономики, включая промышленность.

Аналитики консалтинговой компании McKinsey [19] указывают, что отраслями промышленности с максимальным потенциалом для внедрения аналитики на основе больших данных являются фармацевтическая, химическая и добывающая, где незначительные изменения характеристик процесса способны существенно повлиять на результат, что создает условия для применения «углубленной аналитики» (англ. advanced analytics) – обработки экономических данных с помощью статистических и иных математических инструментов для оценки и совершенствования различных сфер деятельности.

Ряд публикаций, о которых речь пойдет ниже, носит *инженерный* характер и касается моделей функционирования смарт-предприятий или отдельных аспектов их функционирования, механизмов перехода к «умным» предприятиям, а также методов экономико-математического моделирования, связанных с этими процессами. Опуская в анализе часть публикаций, в которых речь идет о сугубо технических моментах, связанных с внедрением кибер-физических систем (см. блок технико-технологическое направление на рис. 1), приведем наиболее информативные из них.

Традиционные подходы к централизованному контролю и жесткому управлению не могут справиться с обширной экосистемой сетевых систем, которые получают все большее распространение в экономике в целом и производственной сфере в частности, что требует использования инструментария моделирования для предсказания поведения таких систем в тех или иных ситуациях и разработки оптимальных управленческих воздействий. Однако, поскольку инструменты моделирования и симуляции, как правило, создаются для применения в конкретной сфере, то возникают сложности с разработкой моделей, поскольку необходимо моделировать как физические, так и кибернетические аспекты таких систем [23]. При моделировании кибер-физических систем используются такие инструменты моделирования, как *гибридные сети Петри, гибридные автоматы и гибридные процессы, техники агрегированного моделирования (включая такие инструменты, как Dymola и gPROMS)* [38]. Следует подчеркнуть, что в данном случае речь идет именно о моделировании кибер-физических систем, а не о моделировании экономических аспектов функционирования предприятий.

Так, одной из основных тенденций последних лет в сфере моделирования является использование при работе с языками моделирования преимуществ, свойственных современным языкам программирования и

средствам разработки [2]: объектная ориентированность, библиотеки классов и визуальные среды. Так, одно из самых популярных в настоящее время средств Modelica представляет собой среду визуального моделирования, включающую универсальный объектно-ориентированный язык Modelica для моделирования сложных физических систем и собственно инструментальные средства, такие как пакеты Dymola или MathModelica. Пакет Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), поддерживающий язык моделирования Modelica, является комплексным инструментом для моделирования и исследования сложных систем в таких областях как мехатроника, автоматика, аэрокосмические исследования и др. [22]. Возможность объединения в одной модели компонентов различной физической природы позволяет строить модели сложных систем, лучше соответствующие реальности и получать более точные и прозрачные результаты.

О критической важности развития кибер-физических систем отмечено в [8] с точки зрения национальных интересов и в первую очередь для создания новых цифровых производств с невиданной ранее экономической эффективностью. Однако, расчеты последствий влияния цифровых технологий на экономику осуществляются на базе точечного практического опыта функционирования существующих цифровых производств, без использования инструментария экономико-математического моделирования. Реальность мира реализуется в виде моделей и наполняющих ее данных, поэтому для создания систем, способных работать в реальном мире, нужна новая дисциплина – *проектирование моделей (model engineering)*. Для понимания новой идеологии жизненного цикла производства и его продуктов (PLM) необходимо объединение строительной информационной модели (BIM) с производственной информационной моделью (PLM), образующее совершенное новое качество. Как видно, авторы работы [8] значительно внимание уделяют моделированию кибер-физических систем, однако речь идет в основном об инженерном моделировании.

Китайские авторы в работе [44] утверждают, что моделирование цифрового производства не требует каких-либо специфических подходов к моделированию – в нем используются стандартные методы моделирования. Жизненный цикл модели цифрового производства включает в себя сбор данных, обработку данных, передачу данных, осуществление контроля, управление взаимодействиями и поддержку принятия решений. Объектами моделирования являются продукция, ресурсы, информация, организационные аспекты, принятие решений, процесс производства и сетевая среда (модели взаимодействия). Таким образом, авторы предлагают использовать стандартные средства моделирования и модели, включая *процессные модели, объектные модели, структурные модели, модели сетей Петри* [43], *оптимизационные модели* и т.п.

Существенным потенциалом практического применения как в обосновании общих направлений внедрения smart-технологий, так и в выборе и планировании конкретных мероприятий обладает инструментарий *оптимизационного моделирования* [7]. Оптимизационная модель состоит из целевой функции, способной принимать значения в пределах области, ограниченной условиями задачи (области допустимых решений), и ограничений, характеризующих эти условия. При моделировании smart-предприятий оптимизационные

модели могут использоваться для выбора технологий для внедрения, определения оптимальных параметров технологических процессов или инвестиционных проектов и решения других задач, связанных с выбором из имеющихся альтернатив.

В работе [6] представлены *модели цифровой трансформации промышленности* на макроуровне в рамках процессного, отраслевого и технологического подходов. Модель процессного подхода основывается на рассмотрении промышленности как производственной цепочки от разработки промышленной продукции до ее продажи и сервисного обслуживания. К элементам цифровой трансформации промышленности относят: цифровый центр НИОКР, цифровую фабрику, цифровую склад и транспорт, электронную торговлю и цифровые услуги. Отмечено, что первыми инструментами цифровой трансформации промышленности могут стать создание Евразийской сети трансфера технологий и Евразийской сети промышленной кооперации и субконтрактации. В работе [6] модели цифровой трансформации промышленности в рамках процессного, отраслевого и технологического подходов представлены только в объектном виде. Экономико-математические модели цифровой трансформации промышленности отсутствуют, однако предлагается на государственном уровне поддерживать внедрение информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства, внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), включая системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA-системы).

Что касается моделей микроуровня, в работе [37] предлагается так называемая «*Модель С*» *цифрового производства*, в названии которой «С» символизирует статистическую обработку и симуляцию (моделирование). В рамках этой модели для создания гибкой и эффективной цепочки создания стоимости предлагается цифровая производственная система с замкнутым циклом с автономным модулем статистической аналитики и автономным модулем моделирования дискретных событий. Для взаимодействия с персоналом в данной модели предложено использовать панель прогнозирования и интерактивный интерфейс планирования производства. Предложенная авторами модель не является экономико-математической моделью, а скорее является авторским видением использования экономико-математических моделей в управлении производством: так, на основе анализа статистической информации предлагается прогнозировать кризисные ситуации (выход оборудования из строя), спрос и другие факторы, а планирование производства сделать интерактивным и корректировать в режиме реального времени с использованием соответствующего интерфейса.

В качестве примера практической реализации концепции smart-предприятия можно привести программное средство от компании Pharaos Navigator [Pharaos Navigator], предназначенное для предприятий различных сфер деятельности (производство, услуги и т.п.). Оно позволяет визуализировать работу умного предприятия, выводя в наглядной форме результаты съема данных с умных датчиков на всем оборудовании и позволяя тем самым руководству в режиме реального времени получать информацию о работе предприятия.

В работе [9] основное внимание уделяется стандартизации процессов цифровой трансформации промышленности, а также вопросам информационного моделирования производственных систем. Выделяют два блока международных стандартов, специфичных для моделирования производственных систем и обмена данными: стандарты производственных ресурсов и процессов; стандарты строительства/моделирования объектов. В статье представлена характеристика стандартов и их назначение для информационного моделирования. Анализ статьи [9] показал, что основное внимание уделяется *стандартизации информационного и инженерного моделирования производственных систем* в целях цифровой трансформации, однако не достаточно исследованными остаются вопросы стандартизации экономико-математического моделирования смарт-предприятий и экономических задач, решаемых на этапе их становления.

В работе [16] исследуются такие последствия внедрения новых технологий и создания «умных» предприятий, как техногенные катастрофы, серьезные проблемы на производстве от хищения конфиденциальных данных до полного паралича производства. По этой причине развертывание реальных систем требует проведения прикладных исследований, в ходе которых инженеры-разработчики используют специальное оборудование, имитирующее реальные производственные процессы, то есть предлагается осуществлять практическое моделирование производственных систем до их развертывания в реальных условиях.

Наиболее интересными с точки зрения экономико-математического моделирования являются работы, посвященные экономическому обоснованию эффективности внедрения смарт-индустрии и ее влияние на экономику страны и социально-экономические процессы.

Начнем анализ этого направления с работы [39], в которой на основе опроса ряда нидерландских компаний, работающих в различных сферах делается вывод о том, что компании активно занимаются внедрением элементов смарт-промышленности, причем чем крупнее компания, тем активнее она работает в этой сфере. Тем не менее, в работе не приводится каких-либо расчетов или даже оценочного суждения проинтервьюированных компаний в отношении качественных или количественных показателей внедрения смарт-технологий или экономического эффекта от их внедрения. Данная работа является показательной, поскольку иллюстрирует целый пласт работ на данную тему, в которых можно условно выделить несколько элементов: краткое или более пространное перечисление определений смарт-промышленности, цифровых технологий, больших данных и т.п.; набор утверждений о том, что это очень важно и сулит различные преимущества; если заявлена какая-либо модель или система, как правило, под этим представляют достаточно абстрактный рисунок. При этом каких-либо расчетов, экономико-математических моделей или анализа статистических данных не приводится. Таким образом, подавляющее число работ на тему смарт-промышленности, как и вышеописанная работа [39], сводятся к тому, чтобы убедить читателя в важности этого направления, однако лишены какой-либо научной или практической новизны.

Следующие несколько работ представляют собой приятное исключение из обозначенной выше тенденции.

Так, в корейском исследовании, посвященном влиянию смарт-промышленности на развитие городов и экономику страны в целом [31], использован следующий подход: выделены основные отрасли-поставщики и отрасли-потребители смарт-продукции (прежде всего компьютерной техники, микросхем, промышленной автоматизации, коммуникационного оборудования и т.п.) и на основе *таблиц «затраты-выпуск»* проанализировано влияние спроса на такую продукцию на объемы производства в городе, занятость, добавленную стоимость и т.п. Безусловным преимуществом этой работы является попытка дать численную оценку смарт-производству (в отличие от абстрактного подхода, свойственного многим другим работам), а также выделения конкретного перечня смарт-продукции. На примере реализации программы развития смарт-городов в Корее показан соответствующий экономический эффект – вложение 10 млн. долларов в такую программу позволило увеличить выпуск продукции на 19 млн. долларов за счет увеличения спроса в смежных отраслях. Недостатком работы является то, что не было проведено сравнения инвестиций в смарт-отрасли с инвестициями в другие отрасли, вследствие чего не был получен ответ на вопрос о том, дает ли 1 доллар инвестиций в смарт-отрасли больший или меньший эффект, чем при осуществлении вложений в традиционные отрасли.

В работе [20] на статистике по промышленным предприятиям США анализируется влияние принятия решений на основе данных на добавленную стоимость, создаваемую на предприятии, и делается вывод о том, что внедрение практики принятия решений на основе данных в среднем увеличивает размер добавленной стоимости на 3%. Для оценки используется *регрессионный анализ на основе производственной функции (подобной функции Кобба-Дугласа)* с добавленной стоимостью в качестве зависимой переменной и производительностью труда, капиталом, трудовыми ресурсами, потреблением энергии, ИТ-капиталом (в виде стоимости аппаратного и программного обеспечения), мерой структурированного управления (степень автономности персонала среднего звена в принятии решений) и принятием решений на основе данных в качестве факторов. В качестве достоинств подхода можно отметить попытку проанализировать влияние на эффективность производства не просто инвестиций в ИТ-инфраструктуру, а именно использование результатов анализа данных в принятии решений. К числу недостатков предложенного подхода следует отнести абстрактность самого понятия «принятия решений на основе данных», а также то, что в качестве параметра используется сам факт внедрения такого подхода (для каждого отдельного предприятия этот параметр может быть оценен как 0 или 1), установленный по результатам анкетирования предприятий, поэтому остается открытым вопрос об интенсивности и направлениях использования такого подхода. Кроме того, недостатком является включение в функцию таких слабо поддающихся оценке факторов, как мера структурированного управления и принятие решений на основе данных, а также использование численности персонала в качестве показателя трудовых ресурсов.

С точки зрения перспектив внедрения смарт-технологий в конкретных отраслях промышленности заслуживает интереса видение таких перспектив руководством предприятий металлургической отрасли, отраженное в результатах опроса, проведенного консалтинговым агентством PwC среди более 2 000 респондентов из девяти основных промышленных секторов и 26 стран [13]. Так, по мнению руководства металлургических предприятий, внедрение цифровых технологий повышает маневренность цепочек поставок, способствует более глубокому пониманию процессов и увеличивает уровень загрузки производственных мощностей. Автоматизация в сочетании с анализом данных используется для обеспечения гибкости и эффективности производства. Для повышения производительности применяются алгоритмы, позволяющие проследить связь между физическими свойствами исходных материалов для производства и производственными затратами, а также факторами, ограничивающими производственную деятельность предприятий. В целом, руководство металлургических предприятий ожидает, что в 2016-2021 гг. внедрение цифровых технологий позволит увеличивать выручку в среднем на 2,7% в год и сокращать затраты в среднем на 3,2% в год.

В работе [11] внимание уделяется влиянию цифровой трансформации (цифровых технологий, Интернета) на рынок труда и производительность труда. Многие экономически развитые страны сталкиваются с нарастающей поляризацией рынков труда и ростом неравенства — отчасти потому, что новые технологии дополняют собой более квалифицированный труд и, в то же время, замещают стандартные трудовые операции, вынуждая многих работников конкурировать друг с другом за низкооплачиваемые рабочие места. Несмотря на то, что непосредственно в сфере цифровых технологий создается довольно скромное количество рабочих мест, однако число рабочих мест, созданию которых эти технологии способствуют, может быть немалым.

В целом характер публикаций, посвященных моделированию смарт-промышленности и процессов ее внедрения, носит несистемный, обрывочный и незавершенный характер. Это является следствием того, что данное научное направление еще очень молодо, устоявшиеся концепции внедрения смарт-промышленности и ее моделирования отсутствуют, а существующие примеры практической реализации смарт-предприятий основываются больше на эвристических методах, чем на точных математических обоснованиях. Как видно, из приведенного выше анализа, большинство публикаций, посвященных становлению смарт-индустрии, носят либо описательно-ознакомительный характер, либо рассматривают этот процесс с инженерной точки зрения, что охватывает преимущественно технико-технологическое и информационные направления (рис. 1). Немногочисленные математические модели, которые в них упоминаются (но не приводятся в явном виде) являются сугубо прикладными и решают технические задачи.

Публикации же, в которых затрагиваются экономические аспекты Промышленности 4.0, малочисленны. При этом если и встречаются математические обоснования каких-то выводов, то носят они, как правило, эмпирический дескриптивный характер, осно-

ванный на существующих наблюдениях, а методическое разнообразие используемых экономико-математических моделей в лучшем случае охватывает корреляционно-регрессионный анализ.

Однако нужно также заметить, что условия для смарт-индустриализации в странах с эмерджентной экономикой существенно отличаются от таковых в странах Запада. Это не только технологическое отставание, но и слабость государственных институтов, незащищенность капитала и инвестиций, непредсказуемость государственной политики (в области налогов, финансов, торговли, международных отношений и т.д.), недостаток государственной финансовой поддержки, коррупция [15, 36, 41]. Все это делает бессмысленным прямое переложение западного опыта проведения смарт-индустриализации и требует более тщательного научного обоснования целесообразности и экономической эффективности реализации тех или иных мероприятий. Как отмечается в исследовании исполнительного комитета СНГ по состоянию, проблемам и перспективам развития информационного общества, необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие правильно понять и исследовать открывающуюся перед ним новую высокодинамичную информационную картину мира [15]. Методы экономико-математического моделирования, позволяющие получить объективные и непредвзятые количественные обоснования, должны занять среди этих методов важную нишу.

Исходя из приведенного анализа актуальных направлений исследования становления смарт-промышленности на Западе и с учетом особенностей эмерджентной экономики, можно выделить следующие перспективные направления экономико-математического моделирования смарт-предприятий.

1. В первую очередь интерес вызывает эволюция макроэкономической производственной функции в связи с переходом к неоиндустриальной смарт-экономике. Использование методов экономико-математического моделирования дает возможность теоретически обосновать качественные изменения этой функции в связи с появлением новых технологических комбинаций классических факторов производства, и, возможным появлением нового фактора производства в виде информатизации или искусственного интеллекта.

Можно предложить несколько спецификаций производственной функции предприятий с учетом действия этого нового фактора (обозначим его I):

– мультипликативной функцией (аналог Кобба-Дугласа):

$$y = \alpha_0 K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} I^{\alpha_3},$$

где факторы производства представлены в натуральном измерении;

– аддитивно-мультипликативной функцией:

$$y = a_1 K + a_2 L + a_3 I + a_4 KL + a_5 KI + a_6 LI + a_7 KLI,$$

где факторы производства представлены в стандартизованном виде.

Второй вариант может оказаться более информативным для статических моделей, поскольку способен отразить различные мультипликативные эффекты, получаемые от разных сочетаний факторов. Если же рассматривать развитие производственной функции в ди-

намике, то информативнее может оказаться первый вариант, так как есть основания полагать, что параметр αZ описывается некой S-образной кривой, зависящей от времени, например кривой Гомперца или логистической кривой:

$$\alpha Z = \frac{1}{1 + be^{-at}}.$$

Выбор S-образной кривой обусловлен лавинообразным характером процессов информатизации, и, возможно, развития искусственного интеллекта, когда приросты зависят от достигнутого уровня, и сначала идут с ускорением развития, а затем по мере насыщения – с замедлением.

Другое направление использования экономико-математического моделирования смарт-предприятий имеет уже более практическую направленность. К таким моделям можно отнести следующие.

2. Всевозможные вариации модели Леонтьева «Затраты-Выпуск» и межотраслевого баланса, с помощью которых можно решать минимум три задачи:

– сквозного планирования и управления промышленностью на основе единого цифрового пространства промышленности;

– обоснования предприятий, требующих первоочередной цифровой интеграции, оценки потерь от сохранения «несмартизированных» участников создания цепочек стоимости и т.п.;

– повышения спроса в условиях внедрения цифровых бизнес-моделей и расширения цифрового взаимодействия с клиентами за счет снижения транзакционных издержек.

В качестве коэффициентов технологической матрицы модели «Затраты-Выпуск» можно использовать не только натуральное выражение затрат, но денежное. При этом, в денежном выражении коэффициента затрат можно выделить определенные стоимостные компоненты, например, затраты труда (l_{ij}), затраты на транспортировку (tr_{ij}), транзакционные издержки, связанные с промежуточным и конечным потреблением продукции (z_{ij}). Таким же образом можно рассматривать фактор времени (t_{ij}), как элемент затрат, связанный с организацией цепочки создания стоимости.

Это открывает целый пласт уже оптимизационных задач, позволяющих определить взаимосвязанные отрасли и потребителей, в наибольшей степени нуждающихся в интеграции на основании единого цифрового пространства промышленности.

Рассмотрим один из вариантов общей математической постановки таких задач.

Предположим, что затраты z_{ij} матрицы затрат межотраслевого баланса можно снизить за счет смартизации производств в отраслях i и j :

$$z'_{ij} = z_{ij} (1 - S_i S_j),$$

где S_i, S_j – некий уровень смартизации предприятий, измеряемый величиной в диапазоне (0; 1). (Причем, заметим, если одна из взаимодействующих сторон не является смарт-предприятием, эффекта снижения затрат наблюдаться не будет). Сам же уровень смартизации предприятий является некоторой S-образной функцией от инвестиционных затрат K , связанных с преобразованием традиционного предприятия в смарт-предприятие:

$$S_i = \frac{1}{1 + b_i e^{-m_i K_i}}, \quad S_j = \frac{1}{1 + b_j e^{-m_j K_j}}.$$

Есть основания предполагать, что в рамках одной отрасли связь инвестиционных затрат с уровнем смартизации описывается одной и той же функцией (параметр b одинаков), и отличается лишь параметром масштаба производства (m_i, m_j), так как очевидно, чем крупнее предприятие, тем больше «умного» оборудования необходимо внедрить, чтобы достичь того же уровня смартизации производства.

Тогда задача по снижению издержек производства за счет внедрения смарт-индустриализации в рамках ограниченных инвестиционных ресурсов можно представить в виде:

$$\sum_i X_i \sum_j z'_{ij} \Rightarrow \min$$

$$X = (E - A)^{-1} Y,$$

$$z'_{ij} = z_{ij} \left(1 - \frac{1}{1 + b_i e^{-m_i K_i}} \cdot \frac{1}{1 + b_j e^{-m_j K_j}} \right),$$

$$\sum_{\forall i} K_i \leq K_{\text{lim}},$$

где $A = (a_{ij})_{n \times n}$, технологическая матрица – элементы которой $a_{ij} = x_{ij}/X_j$ показывают, сколько продукции отрасли i необходимо затратить для производства одной единицы продукции отрасли j , $Y_{n \times 1}$ – вектор-столбец конечной продукции.

Работы по созданию цифровых B2B-площадок уже ведутся не только в странах Запада, но и на территории ЕАЭС [6]. Взаимодействие смарт-предприятий в рамках таких цифровых площадок существенно снижает транзакционные издержки, создает условия для развития системы сквозного планирования и управления в промышленности, высвобождает в стоимости продукции ресурсы, которые увеличивают национальный доход (квадрант 2) и, соответственно, объем конечного потребления, что тоже может быть оценено балансовыми моделями.

3. Третьим направлением экономико-математического моделирования смарт-предприятий можно назвать вариации сетевых моделей, транспортной задачи, задачи о назначениях и т.п. Построение сетевого графа взаимодействий потребителей, производителей и других контрагентов, например, в какой-то конкретной отрасли позволит найти решение следующим проблемам:

– обоснования сетевых эффектов при создании смарт-предприятий в данной отрасли и оценить тот, минимально необходимый уровень цифровизации сети, при котором затраты от дальнейшего внедрения «умных» технологий будут компенсироваться ростом эффективности сети в целом;

– в рамках ограничений на объем доступных инвестиционных ресурсов определение предприятий, нуждающихся в первоочередной цифровизации своих производств так, чтобы путь прохождения заказа от заявки до его получения оказался с минимальными издержками;

– оптимизации движения товаров (от их проектирования до потребления конечными клиентами) в условиях интернета вещей и «умной» инфраструктуры.

Стандартная целевая функция в таких задачах состоит в минимизации издержек при движении из начальной в конечную вершину.

$$Z = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ,$$

где x_{ij} искомый объем груза, перемещаемый из i -й вершины в j -ю; затраты c_{ij} на это перемещение (для различных дуг могут быть как постоянными, так и зависеть от объема перемещаемого груза).

Стандартные ограничения: все потребители должны быть удовлетворены, суммарное производство равно суммарному потреблению:

$$\begin{aligned} \sum_j x_{ij} &= a_i, \quad \forall i, \\ \sum_i x_{ij} &= b_j, \quad \forall j, \\ \sum_i a_i &= \sum_j b_j. \end{aligned}$$

Очевидным расширением этой задачи является определение эффективного пути в условиях возможности смартизации отдельных предприятий, входящих в данную сеть. Тогда добавятся ограничения

$$c'_{ij} = c_{ij} \left(1 - \frac{1}{1 + b_i e^{-m_i K_i}} \cdot \frac{1}{1 + b_j e^{-m_j K_j}} \right),$$

$$\sum_i K_i \leq K_{\text{lim}}.$$

Цифровизация и интернет вещей способны снизить практически до нуля стоимость движения через некоторые промежуточные вершины, связанные с транзакционными и организационными издержками. Кроме того, они расширяют для потребителя доступное для анализа количество вершин, увеличивая размерность графа, и соответственно, делая выбор более обоснованным и эффективным. Доступность некоторых вершин математически в данной задаче можно регулировать ограничением по пропускной способности вершины. Для некоторых вершин, определяющих общеизвестный магистральный путь, она будет постоянной величиной, для других – величиной, пропорциональной степени интеграции данного предприятия в Промышленный Интернет вещей, то есть пропорциональной величине $S_i = \frac{1}{1 + b e^{-m K_i}} \in (0; 1)$:

$$\begin{aligned} \sum_i x_{ij} &\leq P_j S_j, \quad \forall j, \\ \sum_j x_{ij} &\leq P_i S_i, \quad \forall i, \end{aligned}$$

где P_i – номинальная (базовая, потенциальная) пропускная способность вершины.

4. Еще одним актуальным направлением экономико-математического моделирования, является оценка социальных эффектов, связанных с последствиями влияния цифровизации экономики на занятость населения. Замена кибер-физическими системами человеческого труда несет риски массового высвобождения работников из сферы производства – сферы первичного распределения доходов. В этом случае эффекты от снижения транзакционных издержек в условиях Интернета вещей могут оказаться ниже, чем негативные эффекты от уменьшения платежеспособного спроса, связанного со снижением первичных доходов населения, занятого в сфере производства.

Инструментарием для оценки подобных эффектов может стать стохастическое моделирование, в частности корреляционно-регрессионные модели для оценки стохастических зависимостей, а также имитационные модели для оценки последствий тех или иных сценариев проведения смарт-индустриализации для занятости, доходов населения и экономики в целом.

Некоторые зависимости, которые требуют оценки, спецификации и параметризации в рамках такого направления исследования:

1) затраты труда (L_i) в отрасли i в зависимости от степени смартизации этой отрасли (S_i) (оценка высвобождения специалистов);

2) потребности в труде (L) в регионе в зависимости от степени смартизации различных отраслей этого региона (оценка появления новых вакансий);

3) объемы производства (Q) в регионе в зависимости от степени смартизации различных отраслей этого региона (оценка изменений);

4) налогооблагаемые доходы населения в зависимости от возможного роста объемов производства и изменений в затратах труда (оценка изменений);

5) отчисления из доходов населения (оценка изменений в соответствующих фондах);

6) объемы потребления домохозяйств в зависимости от доходов населения (оценка изменений);

7) нагрузка на социальные фонды в зависимости от количества населения (N) и уровня его занятости.

Эти (и, вероятно, еще многие другие) зависимости можно объединить в единую имитационную модель, анализ которой позволит оценить сбалансированность развития смарт-экономики, как минимум по двум контурам: баланс доходов населения и расходов на расширенное потребление; баланс поступлений в бюджеты и социальные фонды и потребностей в расходовании средств из них.

Использование аппарата экономико-математического моделирования в обосновании программ смарт-индустриализации в странах с эмерджентной экономикой позволит получить научные обоснования решения проблем становления смарт-предприятий, повысить эффективность этих процессов.

Выводы. Новая промышленная революция основывается на достижениях шестого технологического уклада, который характеризуется массовым внедрением технологий аддитивного производства, нанотехнологий и биоинженерии, полной цифровизацией производств, эксплуатацией кибер-физических систем, обладающих искусственным интеллектом, созданием глобальной информационной сети товаров, транспорта, зданий, производств, способных взаимодействовать друг с другом самостоятельно без вмешательства человека. Страны бывшего СССР, промышленность которых основана на технологиях 3-го и 4-го технологических укладов, сильно отстают в своем развитии от Западных стран, и возможности эволюционно догнать их выглядят сомнительно. В то же время создание новых предприятий, эксплуатирующих технологии 6-го укладов, может помочь им занять определенные ниши в мировом цифровом производстве.

Наиболее эффективным способом обоснования экономической целесообразности создания смарт-предприятий и преобразования существующих пред-

приятый в смарт-предприятия является использование инструментария экономико-математического моделирования, позволяющего проводить эксперименты с проектируемой системой, изучать ее свойства, оценивать эффективность, предвосхищать возникновение проблем и ошибок. Несмотря на достаточно хорошую развитость современного аппарата экономико-математического моделирования, новизна решаемых задач при создании смарт-предприятий не позволяет сделать однозначный выбор в пользу применения каких-то конкретных инструментов. Для обоснования такого выбора видится полезным изучение зарубежного опыта применения подобных методов при создании смарт-предприятий.

Объекты исследования, которым уделяется внимание в публикациях, посвященных четвертой промышленной революции и смарт-предприятиям, можно классифицировать по трем направлениям. Это *технико-технологическое направление*, описывающее работу сенсоров, датчиков, робототехники и киберфизических систем, технологий идентификации товаров, киберзащиты, передачи данных и т.д. Второе направление — *информационное*, описывающее работу информационных систем различного уровня на предприятиях, технологии работы с большими данными, и подходы к стандартизации процессов разработки смарт-предприятий и их элементов. Наконец, третье — *экономическое направление* — связано с обоснованием экономической целесообразности цифровизации отдельных сегментов экономики, либо с ее влиянием на социально-экономические процессы.

Большинство публикаций, посвященных становлению смарт-индустрии, носят либо описательно-ознакомительный характер, либо рассматривают этот процесс с инженерной точки зрения, что охватывает преимущественно технико-технологическое и информационные направления. Немногочисленные математические модели, которые в них упоминаются (но не приводятся в явном виде) являются сугубо прикладными и решают технические задачи. Публикации же, в которых затрагиваются экономические аспекты Промышленности 4.0, вообще малочисленны. При этом если и встречаются математические обоснования каких-то выводов, то носят они, как правило, эмпирический дескриптивный характер, основанный на существующих наблюдениях, а методическое разнообразие используемых экономико-математических моделей в лучшем случае охватывает корреляционно-регрессионный анализ.

Отдельный большой пласт публикаций, посвященных смарт-предприятиям, связан с большими данными, которые наряду с программным обеспечением кибер-физических систем составляют основу информационного обеспечения смарт-промышленности. Максимальный потенциал для внедрения аналитики на основе больших данных имеется в фармацевтической, химической и добывающей отраслях, в которых незначительные изменения характеристик процесса способны существенно повлиять на результат, что создает условия для применения «углубленной аналитики» — обработки экономических данных с помощью статистических и иных математических инструментов для оценки и совершенствования различных сфер деятельности.

Большое количество проанализированных публикаций носит инженерный характер, и отражают осо-

бенности проектирования тех или иных объектов смарт-индустрии и кибер-физических систем. Объектами моделирования являются продукция, ресурсы, информация, организационные аспекты, принятие решений, процесс производства и сетевая среда (модели взаимодействия). При этом в целом для решения данных задач предлагается использование стандартных средств моделирования, включая процессные модели, объектные модели, структурные модели, модели сетей Петри, оптимизационные модели, гибридные автоматы, системы массового обслуживания, балансовые модели «затраты-выпуск», техники агрегированного моделирования (включая такие инструменты, как Dymola и gPROMS) и т.п. Тем не менее, представленные в данных публикациях модели, как правило, ограничиваются объектным представлением в виде схем и графов, что делает невозможным их прямое практическое использование и дает широкий спектр всевозможных интерпретаций о том, как эти модели можно специфицировать для решения конкретных прикладных задач.

Среди немногочисленных публикаций, аргументирующих экономические последствия внедрения смарт-предприятий, доказывається экономическая целесообразность таких мероприятий. В частности, корейский опыт инвестирования в развитие смарт-промышленности позволил существенно увеличить выпуск продукции за счет увеличения спроса в смежных отраслях. На предприятиях США, использующих в принятии решений большие данные (не зависимо от объемов) средний рост добавленной стоимости составляет 3%. Несмотря на то, что непосредственно в сфере цифровых технологий создается довольно скромное количество рабочих мест, многие публикации подтверждают, что данные технологии способствуют созданию рабочих мест в смежных областях и сокращения рабочих мест, связанного с автоматизацией производственных процессов, можно избежать.

В целом характер публикаций, посвященных моделированию смарт-промышленности и процессов ее внедрения, носит несистемный, обрывочный и незавершенный характер. Это является следствием того, что данное научное направление еще очень молодо, устоявшиеся концепции внедрения смарт-промышленности и ее моделирования отсутствуют, а существующие примеры практической реализации смарт-предприятий основываются больше на эвристических методах, чем на точных математических обоснованиях. Подавляющее число работ на тему смарт-промышленности, сводятся к тому, чтобы убедить читателя в важности этого направления, однако лишены какой-либо научной или практической новизны.

Особенности стран с эмерджентной экономикой, специфика и уровень развития их институтов делают бессмысленным прямое заимствование западного опыта проведения смарт-индустриализации и требуют тщательного научного обоснования целесообразности и экономической эффективности реализации тех или иных мероприятий. Однако, исходя из обзора зарубежного опыта, экономико-математическое моделирование смарт-предприятий не требует создания принципиально новых типов моделей. Оно может быть осуществлено путем развития хорошо известных моделей, с дополнительной параметризацией отдельных специфически условий, связанных с институциональными особенностями конкретной страны или

территории, уровнем развития ее промышленности и применяемых в ней информационных технологий.

Среди перспективных направлений экономико-математического моделирования смарт-предприятий в странах стран с эмерджентной экономикой выделены следующие.

Использование модификаций *производственных функций* – для обоснования качественных изменений в факторах производства, появления новых факторов производства, их новых технологических комбинаций [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Применение модификаций *моделей Леонтьева «затраты-выпуск» и оптимизационных моделей* – для сквозного планирования и управления промышленностью, обоснования предприятий, требующих первоочередной цифровой интеграции, сокращения транзакционных издержек в условиях внедрения цифровых бизнес-моделей и расширения цифрового взаимодействия с клиентами.

Использование модификаций *сетевых моделей и моделей оптимизации* – для оптимизации движения товаров (от их проектирования до потребления конечными клиентами) в условиях интернета вещей и «умной» инфраструктуры, а также для обоснования первоочередных претендентов на цифровизацию в условиях ограничений на объем доступных инвестиционных ресурсов.

Разработка *корреляционно-регрессионных моделей* – для оценки экономических стохастических зависимостей, а также имитационных моделей для оценки последствий тех или иных сценариев проведения смарт-индустриализации позволит оценить последствия этих сценариев для занятости, доходов населения и экономики в целом.

Конкретизация постановки данных моделей и подходов к их реализации требует дополнительного углубленного изучения специфики решаемых задач и формализации отдельных институциональных факторов. Это является предметом дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Василенко В. (2013) Технологические уклады в контексте стремления экономических систем к идеальности // *Соціально-економічні проблеми і держава*. Тернополь. Т. 8. № 1. С. 65-72.
2. Воронин А.В. (2013) *Моделирование технических систем*. Томск: Томский политехнический университет.
3. Глазьев С. (2017) *Битва за лидерство в XXI веке. Россия-США-Китай. Семь вариантов обозримого будущего*. М.: Книжный мир.
4. Громова Т. (2016) Сможет ли мир пережить четвертую промышленную революцию // *Деловая столица*. URL: <http://www.dsnews.ua/future/goryachaya-tema-davosa-smozhet-li-mir-perezhit-chetvertuyu-promyshlennuyu-21012016152500>, дата обращения 23.01.2018.
5. Дасив А.Ф., Руссиян Е.А. (2016) Анализ функционирования промышленности Украины с позиции неоиндустриализации // *Вісник економічної науки України*. № 2. С. 57-65.
6. Евразийская экономическая комиссия (2017) *Анализ мирового опыта развития промышленности и подходов к цифровой трансформации промышленности государств-членов Евразийского Экономического Союза:*

информационно-аналитический отчет. М.: Евразийская экономическая комиссия.

7. Каплан А.В., Каплан В.Е., Машенко М.В., Овечкина Е.В. (2007) *Решение оптимизационных задач в экономике*. М.: Феникс.

8. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Сиягов С.А. (2016) Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // *International Journal of Open Information Technologies*. Vol. 4. № 2. P. 18-25.

9. Куприяновский В.П., Сиягов С.А., Намиот Д.Е., Уткин Н.А., Николаев Д.Е., Добрынин А.П. (2017) Трансформация промышленности в цифровой экономике – проектирование и производство // *International Journal of Open Information Technologies*. Vol. 5. № 1. P. 50-70.

10. Мадых А.А., Охтень А.А. (2018) Моделирование трансформации влияния производственных факторов на экономику в процессе становления смарт-промышленности. *Экономика промышленности*. № 4 (84). С. 26-41. doi: <http://doi.org/10.15407/econindustry2018.04.026>

11. Международный банк реконструкции и развития / Всемирный банк (2016) *Доклад о мировом развитии «Цифровые дивиденды»*. Washington: Международный банк реконструкции и развития / Всемирный банк.

12. Паклин Н.Б., Орешков В.И. (2009) *Бизнес-аналитика: от данных к знаниям*. СПб.: Питер.

13. PwC (2016) «Промышленность 4.0»: создание цифрового предприятия. Основные результаты исследования по металлургической отрасли / PwC. URL: https://www.pwc.ru/ru/mining-and-metals/publications/assets/industry-4-metals-key-findings_rus.pdf, дата обращения 23.01.2018.

14. Романчук Я. (2012) Третья промышленная революция: суть, влияние, последствия. URL: <http://liberty-belarus.info/o-kapitalizme/kapitalizm-dlya-lyuboznatelnykh/item/848-tretya-promyshlennaya-revolutsiya-sut-vliyanie-posledstviya#12>, дата обращения 23.01.2018.

15. Содружество Независимых Государств. Исполнительный комитет (2012) *Состояние, проблемы и перспективы развития информационного общества в СНГ*. М.: Содружество Независимых Государств. Исполнительный комитет.

16. Трофимов Е. (2016) Киберуязвимость умных производств // *Control Engineering Россия*. № 1 (61). С. 34-36.

17. Шеер А.-В. (2016) Что скрывается за термином «Индустрия 4.0». URL: <http://www.i-love-bpm.ru/s%D1%81heer/chto-skrivaetsya-za-terminom-industriya-40>, дата обращения 23.01.2018.

18. Atzori L., Lera A., Morabito G. (2010) The internet of things: a survey // *Computer Networks*. № 54. P. 2787-2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

19. Auschitzky E., Hammer M., Rajagopaul A. (2014) How big data can improve manufacturing. *McKinsey*. URL: <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/how-big-data-can-improve-manufacturing>, дата обращения 28.09.2017.

20. Brynjolfsson E., McElheran K. (2015) Data in Action: Data-Driven Decision Making in U.S. Manufacturing. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/eab9/8520b8a7f7be0641c3e6692711434f02cbc1.pdf>, дата обращения 23.01.2018.

21. Bundesministerium (2017) Innovationen für die Produktion von morgen. URL: https://www.bmbf.de/pub/Industrie_4.0.pdf, дата обращения 08.09.2017.
22. Claytex (2017) Dymola for physical modelling and simulation using Modelica. *Claytex*. URL: <http://www.claytex.com/products/dymola/>, дата обращения 28.09.2017.
23. Fishwick P. (2007) *Handbook of Dynamic System Modeling (Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series)*. New York: Chapman and Hall/CRC.
24. Geisberger E., Broy M. (2012) *Agenda CPS: Integrierte For schungs agenda Cyber-Physical Systems (acatech STUDIE) (German Edition)*. New York: Springer-Verlag.
25. Gruger C., Niedermann F., Mitschang B. (2012) Data Mining-driven Manufacturing Process Optimization // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London: WCE. Vol III. July 4-6. P. 1475-1481.
26. GTAI (2017) Industrie 4.0 – What is it? // *Germany Trade & Invest*. URL: <https://industrie4.0.gtai.de/INDUSTRIE40/Navigation/EN/Topics/Industrie-40/what-is-it.html>, дата обращения 08.09.2017.
27. Hermann M., Pentek T., Otto B. (2016) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios // *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. P. 3928-3937.
28. Hu H., Wen Y., Chua T.-S., Li X. (2014) Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial // *IEEE Access*. Vol 2. P. 652-687.
29. IGI Global (2017) *Information Resources Management Association. The Internet of Things: Breakthroughs in Research and Practice / Information Resources Management Association*. Hershey: IGI Global.
30. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D. (2017) *Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems*. Herausgeber: Springer International Publishing Switzerland.
31. Kim K., Jung J.-K., Choi J.-Y. (2016) Impact of the Smart City Industry on the Korean National Economy: Input-Output Analysis // *Sustainability*. Vol. 8 (7). P. 649-678.
32. Lasi H., Kemper H.-G., Fettek P., Feld T., Hoffmann M. (2014) Industrie 4.0. // *Business & Information Systems Engineering*. Vol. 4 (6). P. 239-242.
33. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H. (2013) Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment // *Manufacturing Letters*. Vol. 1. P. 38-41.
34. Manyika J., Chui M., Brown B., Bughin J., Dobbs R., Roxburgh C., Hung Byers A. (2011) *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. New York: McKinsey Global Institute.
35. Nedelcu B. (2013) About Big Data and its Challenges and Benefits in Manufacturing // *Database Systems Journal*. Vol. 4. Issue 3. P. 10-19.
36. Networked Readiness Index 2015 (2015). URL: <http://reports.weforum.org/global-information-technology-report-2015/economies/#indexId=NRI&economy=UKR>, дата обращения 25.09.2017.
37. Nonaka Y., Suginishi Y., Lengyel A., Katsumura Y. (2015) The S-Model: A digital manufacturing system combined with autonomous statistical analysis and autonomous discrete-event simulation for smart manufacturing. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 24-28 Aug. Gothenburg: IEEE. P. 1006-1011.
38. Reimann M., Ruckriegel C. (2017) *Road2CPS Priorities and Recommendations for Research and Innovation in Cyber-Physical Systems*. Stuttgart: Steinbeis-Editions.
39. Saraee M. How can companies start implementing the Smart Industry concept? URL: https://www.smartindustry.nl/site/assets/files/2158/how_can_companies_start_implementing_the_smart_industry_concept.pdf, дата обращения 08.09.2017.
40. Smart Enterprise demo for manufacturing. *Pharos Navigator*. URL: <https://enterprise.win2biz.com/static/content/en/525/Explaining-Enterprise-Model.html>, дата обращения 08.09.2017.
41. The 2016 IMD World Competitiveness Scoreboard. URL: <http://www.imd.org/globalassets/wcc/docs/scoreboard-2016.pdf>, дата обращения 08.09.2017.
42. Yin S., Kaynak O. (2015) Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends // *Proceedings of the IEEE*. Vol. 103. № 2. P. 143-146.
43. Zaitsev D.A. (2012) Universal Petri Net // *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 48. Issue 4. P. 498-511.
44. Zhou Z., Xie S., Chen D. (2012) *Fundamentals of Digital Manufacturing Science*. London: Springer-Verlag London Limited 2012.

References

- Vasilenko V. (2013) Tekhnologicheskkiye układy v kontekste stremleniya ekonomicheskikh sistem k ideal'nosti [Technological order in the context of the desire of economic systems to ideality]. *Sotsialno-ekonomichni problemy i derzhava – Socio-economic problems and the state*, Vol. 8, № 1, pp. 65-72 [in Russian].
- Voronin A.V. (2013) Modelirovaniye tekhnicheskikh sistem [Modeling of technical systems.]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University [in Russian].
- Glaz'nev S. (2017) Bitva za liderstvo v XXI veke. Rossiya-SSHA-Kitay. Sem' variantov obozrimogo budushchego [Battle for leadership in the XXI century. Russia-USA-China. Seven options for the foreseeable future]. Moscow, Book World [in Russian].
- Gromova T. (2016) Smozhet li mir perezhit' chetvertuyu promyshlennuyu revolyutsiyu [Can the world survive the fourth industrial revolution]. *Delovaya stolitsa – Business Capital*. Retrieved from <http://www.dsnews.ua/future/goryachaya-tema-davosa-smozhet-li-mir-perezhit-chetvertuyu-promy-shlennuyu-21012016152500> [in Russian].
- Dasiv A.F., Russiyan Ye.A. (2016) Analiz funkcionirovaniya promyshlennosti Ukrainy s pozitsii neoindustrializatsii [The Special Aspects of Functioning and Possibilities of Industry Industrialization in Ukraine]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy – Bulletin of Economic Science of Ukraine*, 2, pp. 57-65 [in Russian].
- Yevraziyskaya ekonomicheskaya komissiya [Eurasian Economic Commission]. (2017). Analiz mirovogo opyta razvitiya promyshlennosti i podkhodov k tsifrovoy transformatsii promyshlennosti gosudarstv-chlenov Yevraziyskogo Ekonomicheskogo Soyuza: informatsionno-analiticheskiy otchet [Analysis of world experience in industrial development and approaches to the digital transformation of industry in the member states of the Eurasian Economic Union: an information and analytical

report]. Moscow, Eurasian Economic Commission [in Russian].

7. Kaplan A.V., Kaplan V.Ye., Mashchenko M.V., Ovechkina Ye.V. (2007). Resheniye optimizatsionnykh zadach v ekonomike [Solution of optimization problems in the economy] Moscow: Phoenix [in Russian].

8. Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.Ye., Sinyagov S.A. (2016). Kiber-fizicheskiye sistemy kak osnova tsifrovoy ekonomiki [Cyber-physical systems as a base for digital economy]. *International Journal of Open Information Technologies*, Vol. 4, № 2, pp. 18-25 [in Russian].

9. Kupriyanovskiy V.P., Sinyagov S.A., Namiot D.Ye., Utkin N.A., Nikolayev D.Ye., Dobrynin A.P. (2017) Transformatsiya promyshlennosti v tsifrovoy ekonomike – proyektirovaniye i proizvodstvo [Industries transformation in the digital economy - the design and production]. *International Journal of Open Information Technologies*, Vol. 5, № 1, pp. 50-70 [in Russian].

10. Madykh A.A., Okhten' A.A. (2018) Modelirovaniye transformatsii vliyaniya proizvodstvennykh faktorov na ekonomiku v protsesse stanovleniya smart-promyshlennosti [Modeling the transformation of the impact of production factors on the economy in the process of smart industry formation]. *Econ. promisl. – Economy of Industry*, 4 (84), pp. 26-41. doi: <http://doi.org/10.15407/econindustry> [in Russian].

11. Doklad o mirovom razvitii «Tsifrovyye dividendy» [World Development Report Digital Dividends]. (2016). Washington, International Bank for Reconstruction and Development [in Russian].

12. Paklin N.B., Oreshkov V.I. (2009). Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam [Business Analytics: From Data to Knowledge]. *Saint Petersburg*: Piter [in Russian].

13. PwC. (2016). «Promyshlennost' 4.0»: sozdaniye tsifrovogo predpriyatiya. Osnovnyye rezul'taty issledovaniya po metallurgicheskoy otrasli [“Industry 4.0”: creation of a digital enterprise. The main results of the study in the metallurgical industry]. Retrieved from https://www.pwc.ru/mining-and-metals/publications/assets/industry-4-metals-key-findings_rus.pdf [in Russian].

14. Romanchuk Ya. (2012). Tret'ya promyshlennaya revolyutsiya: sut', vliyaniye, posledstviya [The Third Industrial Revolution: Essence, Impact, Consequences]. Retrieved from <http://liberty-belarus.info/o-kapitalizme/kapitalizm-dlya-lyuboznatelnykh/item/848-tretya-promyshlennaya-revolyu-utsiya-sut-vliyanie-posledstviya#12> [in Russian].

15. Sostoyaniye, problemy i perspektivy razvitiya informatsionnogo obschestva v SNG [State, problems and prospects of development of the information society in the CIS]. (2012). Moscow, Commonwealth of Independent States. Executive committee [in Russian].

16. Trofimova Ye. (2016). Kiberuyazvimost' umnykh proizvodstv [Cyber vulnerability of smart industries]. *Control Engineering Rossiya – Control Engineering Russia*, 1 (61), pp. 34-36 [in Russian].

17. Sheyer A.-V. (2016). Chto skryvayetsya za terminom «Industriya 4.0» [What is behind the term "Industry 4.0"]. Retrieved from <http://www.i-love-bpm.ru/s%D1%81heer/chto-skryvaetsya-za-terminom-industriya-40> [in Russian].

18. Atzori L., Lera A., Morabito G. (2010). The internet of things: a survey. *Computer Networks*, 54, pp. 2787-2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

19. Auschitzky E., Hammer M., Rajagopaul A. (2014) How big data can improve manufacturing. *McKinsey*. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/how-big-data-can-improve-manufacturing>.

20. Brynjolfsson E., McElheran K. (2015) Data in Action: Data-Driven Decision Making in U.S. Manufacturing. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/eab9/8520b8a7f7be0641c3e6692711434f02cbc1.pdf>.

21. Bundesministerium (2017) Innovationen für die Produktion von morgen. Retrieved from https://www.bmbf.de/_pub/Industrie_4.0.pdf.

22. Claytex (2017) Dymola for physical modelling and simulation using Modelica. *Claytex*. Retrieved from <http://www.claytex.com/products/dymola/>.

23. Fishwick P. (2007) *Handbook of Dynamic System Modeling (Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series)*. New York, Chapman and Hall/CRC.

24. Geisberger E., Broy M. (2012) *Agenda CPS: Integrierte For schungs agenda Cyber-Physical Systems (acatech STUDIE) (German Edition)*. New York, Springer-Verlag.

25. Grüger C., Niedermann F., Mitschang B. (2012) Data Mining-driven Manufacturing Process Optimization // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, WCE. Vol III. July 4-6, pp. 1475-1481.

26. GTAI (2017) Industrie 4.0 – What is it? // *Germany Trade & Invest*. Retrieved from <https://industrie4.0.gtai.de/INDUSTRIE40/Navigation/EN/Topics/Industrie-40/what-is-it.html>.

27. Hermann M., Pentek T., Otto B. (2016) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3928-3937.

28. Hu H., Wen Y., Chua T.-S., Li X. (2014) Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial. *IEEE Access*, Vol 2, pp. 652-687.

29. IGI Global (2017) *Information Resources Management Association. The Internet of Things: Breakthroughs in Research and Practice*. Information Resources Management Association. Hershey: IGI Global.

30. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D. (2017) *Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems*. Herausgeber: Springer International Publishing Switzerland.

31. Kim K., Jung J.-K., Choi J.-Y. (2016). Impact of the Smart City Industry on the Korean National Economy: Input-Output Analysis. *Sustainability*, Vol. 8 (7), pp. 649-678.

32. Lasi H., Kemper H.-G., Fette P., Feld T., Hoffmann M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 4 (6), pp. 239-242.

33. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, Vol. 1, pp. 38-41.

34. Manyika J., Chui M., Brown B., Bughin J., Dobbs R., Roxburgh C., Hung Byers A. (2011). *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. New York, McKinsey Global Institute.

35. Nedelcu B. (2013). About Big Data and its Challenges and Benefits in Manufacturing. *Database Systems Journal*, Vol. 4, Issue 3, pp. 10-19.

36. Networked Readiness Index 2015 (2015). Retrieved from <http://reports.weforum.org/global-information-technology-report-2015/economies/#indexId=NR1&economy=UKR>.
37. Nonaka Y., Suginishi Y., Lengyel A., Katsumura Y. (2015). The S-Model: A digital manufacturing system combined with autonomous statistical analysis and autonomous discrete-event simulation for smart manufacturing. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 24-28 Aug. Gothenburg: IEEE, pp. 1006-1011.
38. Reimann M., Ruckriegel C. (2017). *Road2CPS Priorities and Recommendations for Research and Innovation in Cyber-Physical Systems*. Stuttgart: Steinbeis-Editions.
39. Saraee M. How can companies start implementing the Smart Industry concept? Retrieved from [https://www.smartindustry.nl/site/assets/files/2158/how](https://www.smartindustry.nl/site/assets/files/2158/how_can_companies_start_implementing_the_smart_industry_concept.pdf) _
- can_companies_start_implementing_the_smart_industry_concept.pdf.
40. Smart Enterprise demo for manufacturing. *Pharos Navigator*. Retrieved from <https://enterprise.win2biz.com/static/content/en/525/Explaining-Enterprise-Model.html>.
41. The 2016 IMD World Competitiveness Scoreboard. Retrieved from <http://www.imd.org/globalassets/wcc/docs/scoreboard-2016.pdf>.
42. Yin S., Kaynak O. (2015) Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, № 2, pp. 143-146.
43. Zaitsev D.A. (2012). Universal Petri Net. *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 48, Issue 4, pp. 498-511.
44. Zhou Z., Xie S., Chen D. (2012). *Fundamentals of Digital Manufacturing Science*. London: Springer-Verlag London Limited 2012.

Л. В. Нечволода

канд. техн. наук

ORCID ID 0000-0002-7584-6735,

К. Ю. Гудкова,

В. В. Лучинецький,

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МАТЕМАТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ УПРАВЛІННЯ ЛЮДСЬКИМИ РЕСУРСАМИ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Постановка проблеми. Світовий досвід господарювання доводить, що тривале стає функціонування підприємства, його розвиток забезпечується такими чинниками як новітні знання, наукові дослідження, інноваційні технології. Управління впровадженням інноваційних технологій та новітніх наукових досягнень здійснює працівник підприємства, який перетворюється на активного учасника виробництва. Людський ресурс стає головним фактором виробництва. Проте будь-який ресурс вимагає обліку через аналіз поточного стану, визначення зв'язку з іншими ресурсами підприємства, оптимальності формування та ефективності використання, напрямів нарощування та доцільності інвестицій в нього, вплив на ключові показники діяльності підприємства. Тому управління людськими ресурсами є актуальним процесом, який передбачає вивчення психологічних і професійних якостей працівника з метою встановлення його придатності для виконання обов'язків на певному робочому місці або посаді, вибору з сукупності претендентів найбільш відповідного з урахуванням його кваліфікації, спеціальності, особистих якостей і здібностей характеру діяльності, інтересам організації [1]. Одним із завдань управління трудовими ресурсами є раціоналізація відбору персоналу на виконання професійних робіт (найчастіше такий відбір має ієрархічну структуру, що починається з прийняття рішень на рівні структурних підрозділів підприємства). Правильне призначення співробітників на виконання робіт дає

можливість підвищити як продуктивність праці, так і збільшити загальний прибуток підприємства, підвищити мотивацію персоналу. Однак з ростом обсягів робіт, збільшенням кількості критеріїв, які необхідно враховувати для прийняття оптимального рішення, можливі проблемні ситуації для менеджерів та керівників підрозділів підприємств. Одним з суттєвих недоліків прийняття рішення на висновках менеджера можна вважати проблему об'єктивності та ефективності прийнятого рішення [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні проблемі ефективного використання трудових ресурсів присвячено роботи відомих зарубіжних та вітчизняних вчених: А. Маршалла, М. Портера, А. Вороніна, О. Грішнєвої, О. Замори, Є. Качан, А. Пастух, В. Романишина, В. Травіна, В. Геєця, М. Долішнього, В. Онікієнко, Л. Абалкіна, Н. Горелова, Т. Заславської, А. Кочеткова, Д. Белла, В. Іноземцева, Е. Тоффлера. Проте досі недостатньо методологічно розроблені математичні моделі розв'язання задачі розподілу трудових ресурсів на підприємстві.

У монографії [3] пропонується розглядати трудові ресурси в якісному й кількісному аспектах, тобто як економічну категорію й механічну сукупність індивідумів. У кількісному аспекті трудові ресурси аналізуються як планово-обліковий показник, що характеризує їхню величину й структуру.

І. Дубинська підкреслює, що ефективність роботи персоналу є важливим фактором, від якого залежать