

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2020, №3, Том 7 / 2020, No 3, Vol 7 <https://resources.today/issue-3-2020.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf>

DOI: 10.15862/02INOR320 (<http://dx.doi.org/10.15862/02INOR320>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Смышляева А.А., Резникова К.М., Савченко Д.В. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020 №3, <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02INOR320

**For citation:**

Smyshlyaeva A.A., Reznikova K.M., Savchenko D.V. (2020). Modern technologies in Industry 4.0 – cyber-physical systems. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online] 3(7). Available at: <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/02INOR320

УДК 004.62

ГРНТИ 50.43.19

**Смышляева Анна Андреевна**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Магистрант  
E-mail: anyac957@mail.ru

**Резникова Ксения Михайловна**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Магистрант  
E-mail: a-da\_97@mail.ru

**Савченко Денис Валерьевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Магистрант  
E-mail: savchenko.dv@students.dvfu.ru

## Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы

**Аннотация.** С приходом концепции Индустрии 4.0 подход к автоматизации производства принципиально изменился. В основу промышленной индустрии легли такие современные технологии, как интернет вещей, большие данные, облачные вычисления, искусственный интеллект и киберфизические системы. Данные технологии зарекомендовали себя не только в промышленности, но и в других различных отраслях жизнедеятельности. В данной работе авторы рассматривают концепцию киберфизических систем – систем, основанных на взаимодействии физических процессов с вычислительными.

В статье представлена концептуальная модель киберфизических систем, отображающая ее элементы и их взаимодействие. В киберфизических системах она представляет собой пять уровней: физический, сетевой, хранилище данных, уровень обработки и аналитики, уровень приложений. Свою работу киберфизические системы осуществляют при помощи базового набора технологий: интернета вещей, больших данных и облачных вычислений. Дополнительные технологии применяются в зависимости от предназначения системы. На физическом уровне данные собираются с физических устройств. При помощи интернета вещей на сетевом уровне данные передаются в хранилище данных для дальнейшей обработки или

обрабатываются практически сразу благодаря облачным вычислениям. Количество данных в киберфизических системах огромно, поэтому необходимо использовать технологию больших данных и эффективные методы обработки и анализа этих данных. Главной особенностью данного технологического комплекса является работа в режиме реального времени.

Несмотря на повышение качества производства и жизни людей, киберфизические системы обладают рядом недостатков. Авторы освещают основные проблемы киберфизических систем и перспективные направления исследований для их развития. Решив рассмотренный перечень проблем, киберфизические системы выйдут на качественно новый уровень полезности.

Также в работе приведены примеры внедрения концепций, таких как умный город, умное электроснабжение, умное производство, умный дом. В основе данных концепций лежит принцип киберфизических систем.

**Ключевые слова:** киберфизическая система; Индустрия 4.0; интернет вещей; большие данные; умный город; умное электроснабжение; умное производство; умный дом

## Введение

Индустрия 4.0 сегодня является ведущим трендом четвертой промышленной революции. Ее характерной чертой служат полностью автоматизированные производства<sup>1</sup>. Для обеспечения полной производственной автоматизации необходимо развитие и внедрение соответствующих высокопроизводительных систем – киберфизических.

Концепция Индустрии 4.0 основывается на четырех аспектах: виртуализации, интероперабельности (совместимости), децентрализации и работе в режиме реального времени. Эти же аспекты соответствуют и киберфизическим системам (КФС). В таких системах оборудование, датчики и информационные системы соединены друг с другом и могут функционировать почти независимо от человека. Для принятия киберфизическими системами самостоятельных решений, независимых от людей, необходим высокий уровень децентрализации, который позволяют обеспечивать и поддерживать такие современные технологии, как Интернет вещей, большие данные, облачные вычисления и различные методы искусственного интеллекта. Благодаря этому комплексу технологий КФС может производить мониторинг и управление над исполнительными механизмами в режиме реального времени [1].

## Происхождение термина

Киберфизическая система (КФС) – это система, основанная на интеграции вычислений с физическими процессами. Встраиваемые компьютеры совместно с сетями осуществляют мониторинг и контроль за физическими процессами, обычно путем передачи данных через узлы системы, где физические процессы влияют на вычисления и наоборот. КФС это не про объединение физических процессов и киберпространства, а про их пересечение. Недостаточно воспринимать физические и вычислительные системы по отдельности, важно понимать их взаимодействие.

Термин «киберфизические системы» придуман Хелен Джилл в Национальном научном фонде США примерно в 2006 году. Несмотря на то, что многие знакомы с термином «киберпространство», можно неверно его связывать с КФС, хотя корни термина киберфизических систем куда старше и глубже. Поэтому было бы корректнее рассматривать термины «киберфизические системы» и «киберпространство» не как происхождение одного из другого, а как происходящие из одного и того же корня.

Американский математик Норберт Винер, оказавший огромное влияние на развитие теории систем управления, придумал термин «кибернетика». Во времена второй мировой войны Винер впервые применил технологию для автоматического прицеливания и стрельбы из зенитных орудий. И, хотя используемые механизмы не были задействованы с цифровыми компьютерами, примененные математиком принципы аналогичны тем, что используются сегодня в огромных количествах в системах обратной связи и контроля. Винер получил термин от греческого «κυβερνήτης» (kybernetes), что означает рулевой, губернатор, пилот. Данная метафора подходит для систем управления.

Норберт Винер описал свое видение кибернетики как симбиоз управления и коммуникации. Его представление об управлении глубоко укоренилось в системах с замкнутым контуром (с обратной связью), в которых логика управления определяется измерениями физических процессов и, в свою очередь, управляет этими процессами. Таким образом, логика

---

<sup>1</sup> URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/industry>.

управления представляет собой сочетание физических процессов, вычислений и коммуникаций.

Винер не мог предполагать такого развития цифровых вычислений и сетей, какое существует сегодня, но тот факт, что термин «киберфизические системы» может быть неоднозначно истолкован как соединение киберпространства с физическими процессами, помогает подчеркнуть огромное влияние, которое будет оказывать КФС. Киберфизические системы используют информационные технологии, которые намного превосходит даже самые смелые мечты эпохи Винера [2].

### Концептуальная модель киберфизической системы

Концептуальная модель киберфизической системы состоит из пяти уровней: физического, сетевого, хранилища данных, обработки и аналитики, уровня приложений. На рисунке 1 представлена концептуальная модель киберфизической системы.

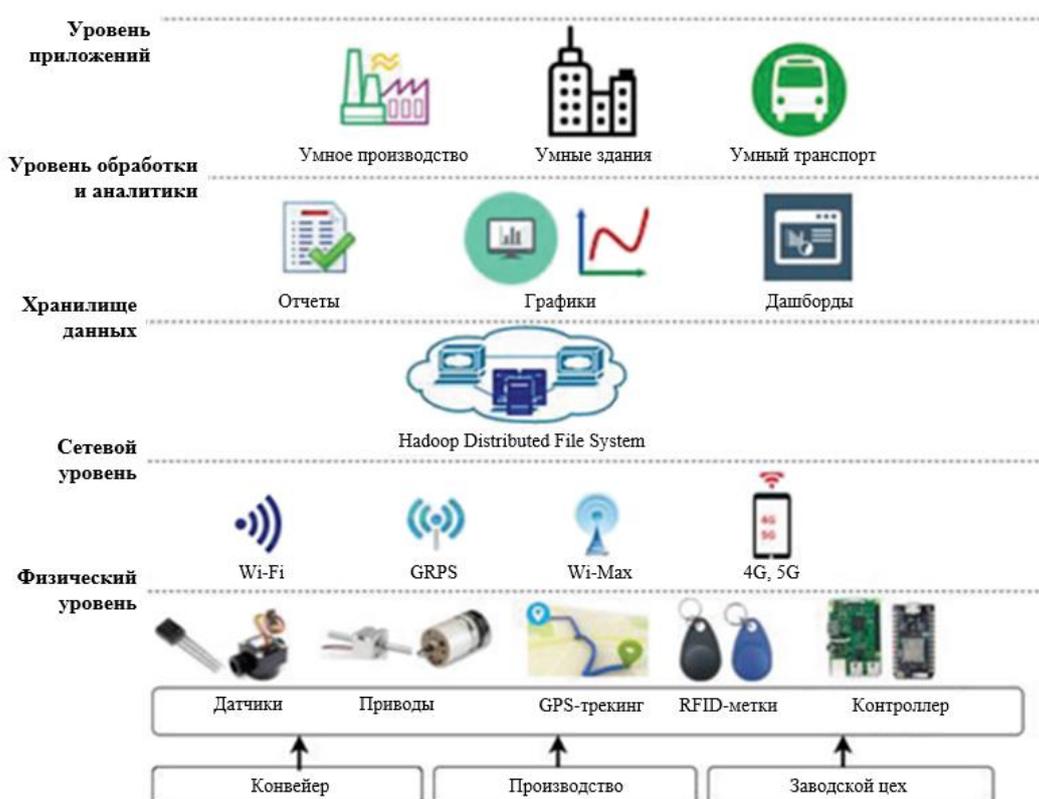


Рисунок 1. Концептуальная модель киберфизической системы [3] (переведено авторами)

#### Физический уровень

Этот слой состоит из датчиков, приводов, отслеживающих устройств и вычислительных элементов. В реальном времени контроллер собирает с датчиков данные и обрабатывает локально и/или передает их в облачное хранилище для дальнейшей обработки.

#### Сетевой уровень

Киберфизические системы могут получать доступ к киберпространству по различным сетевым протоколам, таким как Wi-Fi, WiMAX, GPRS и технологиям 3G/4G/LTE. Другие

облегченные протоколы, такие как MQTT, CoAP, AMQP, WebSocket, Node используются для передачи данных с периферийных устройств в облако для дальнейшего хранения и обработки. Каждый протокол имеет свои преимущества перед другими в зависимости от скорости, задержки, пропускной способности, надежности, безопасности и масштабируемости.

### *Хранилище данных*

Киберфизические системы собирают много данных с объектов, расположенных на физическом уровне. Эти данные могут храниться на локальном сервере или в облаке. Используя распределенную систему хранения данных, например, Hadoop, для резервирования данные могут храниться в кластере из трех различных подчиненных узлов.

### *Уровень обработки и аналитики*

Уровень обработки и аналитики используется для обработки данных, используя имитационные модели, например, размерное моделирование. Используя SQL-запросы, можно генерировать отчеты, графики и дашборды, осуществляя мониторинг в режиме реального времени. Такие методы интеллектуального анализа данных, как кластеризация данных, классификация и регрессия могут использоваться для прогнозов и планирования. Также на этом уровне процессы мониторинга и управления могут быть направлены обратно на физический уровень для приведения в действие некоторых устройств и машин.

### *Уровень приложений*

Этот уровень является пользовательским интерфейсом для конечных потребителей, операторов, производителей, сторонних поставщиков и поставщиков других услуг. Приложения могут относиться к «умной сети», «умной фабрике», «умному зданию», «умному транспорту» и «умному здравоохранению». Также они имеют удобный интерфейс, дающий возможность взаимодействовать с уровнями КФС на основе привилегированного доступа и приоритета [3].

Чтобы проиллюстрировать потенциал и актуальность КФС, в качестве примера можно взять область промышленных удаленных услуг. Промышленный удаленный сервис – это инструмент, которым производители пользуются уже несколько лет для предоставления своим клиентам быстрой и эффективной поддержки посредством удаленного доступа и управления машинами. Киберфизические системы открывают новый потенциал для обеспечения дополнительного роста производительности.

Так, техники больше не будут вручную подключаться к машине, которую они обслуживают. Интеллектуальные производственные системы с самоконтролем передают данные датчиков об их состоянии в режиме реального времени. Полученные, записанные и проанализированные данные позволяют проводить профилактическое обслуживание и открывать другие возможности для снижения затрат на обслуживание и эксплуатацию. Производственные системы будут работать в сетях, похожих на социальные сети, и автоматически подключаться к облачным промышленным платформам удаленного обслуживания, чтобы найти подходящих экспертов для решения данной ситуации. Затем эксперты смогут использовать интегрированные платформы знаний, инструменты для видеоконференций и усовершенствованные инженерные методы для предоставления услуг удаленного обслуживания через мобильные устройства. То есть им будут предоставляться информация и ресурсы в режиме реального времени. Более того, машины будут постоянно

улучшать и расширять свои собственные возможности в зависимости от ситуации, автоматически обновляя или загружая соответствующие функции и данные через стандартизированные безопасные каналы связи с промышленными платформами удаленного обслуживания.

Автор Martin Mikusz [4] отмечает, что появление новых высокотехнологичных разработок заставляют производителей, поставщиков слуг и программное обеспечение меняться. Для своего развития они все должны создавать новые компетенции, стратегии и бизнес-модели, чтобы в конечном итоге стать ключевыми игроками на развивающемся рынке конвергентной ИТ-инфраструктуры.

### **Основные технологии в киберфизических системах**

Создание более эффективных и надежных киберфизических систем может быть достигнуто путем интеграции их с такими технологиями, как Интернет вещей (IoT), облачные вычисления и методы больших данных. Концепция IoT обеспечивает взаимодействие между устройствами КФС, обеспечивая большую платформу для промышленной автоматизации. Каждая КФС на платформе IoT осуществляет контроль и управление за физической средой реального мира.

Киберфизическая система генерирует огромное количество данных, называемых большими данными. Им присущи такие характеристики, как объем, скорость и многообразие. Объем в данном случае – количество данных, измеряемое в петабайтах и терабайтах. Скорость соответствует скорости передачи данных или частоте, с которой данные генерируются и собираются в режиме реального времени. Многообразием больших данных являются различные форматы, в которых эти данные генерируются. Методы больших данных могут обеспечить крупномасштабный анализ данных для мониторинга и их визуализации практически в реальном времени. Облачные вычисления предлагают хранение большого объема данных и их обработку с помощью сложных вычислительных алгоритмов в облаке с наименьшей временной задержкой [3].

### **Проблемы**

Когда КФС используются для мониторинга или регулирования окружающей физической среды, требуются большие потоки данных для пересечения сети датчиков и исполнительных механизмов. Эти потоки накладывают фундаментальные ограничения на производительность и возможности КФС, поскольку они требуют большой пропускной способности и способствуют быстрому истощению энергетических резервов при использовании беспроводной связи. Для смягчения этого ограничения необходимо рассматривать КФС как устройства распределенной обработки информации [5].

В современных КФС отсутствует возможность сбора пространственной информации – информации, связанной с местоположением производимых действий. И, хотя информация о географическом местоположении может храниться в различных формах и на разных уровнях, семантическая поддержка для использования этой информации на разных уровнях реализации системы отсутствует. Киберфизические системы являются типичными встроенными сенсорными системами: они реагируют и управляют пространственно-временной информацией. Тем не менее, им не хватает моделей и методов сбора такой информации, проверки поведения, а также производительности в отношении временных и пространственных требований [6].

## Перспективные направления исследований киберфизических систем

В своей работе Эдвард Эшфорд Ли [7] рассматривает основные проблемы киберфизических систем, препятствующих их развитию, и выявляет перспективные направления исследований и технологий, на которые можно было бы опираться, тем самым содействуя улучшению КФС. Вот некоторые из этих направлений:

- Управление памятью с предсказуемостью. Управление выделением и освобождением памяти вручную подвержено ошибкам и утомительно. Автоматическое управление памятью значительно повышает производительность труда программиста и надежность программного обеспечения за счет предсказуемости синхронизации. Многообещающим началом является семейство методов, которые обеспечивают сбор мусора с ограниченным временем паузы в работе.

- Предсказуемый, управляемый, явный параллелизм. Киберфизические системы по своей сути параллельны. Сегодня широко используются такие методы параллельного программирования, как потоки, но в результате они представляют непонятный и ненадежный код. Существуют более предсказуемые, управляемые и понятные методы для борьбы с параллелизмом. Например, благодаря своей более управляемой модели параллелизма синхронные языки программирования нашли свое применение в системах авионики, где безопасность критически важна.

- Параллельные компоненты. Программные компонентные технологии, в частности объектно-ориентированное проектирование, привели к огромным улучшениям в проектировании больших программных систем. Однако эти технологии глубоко укоренились в последовательных, императивных вычислительных моделях. Следовательно, они плохо адаптируются к параллельным вычислениям в реальном времени. Перспективными альтернативами являются компонентно-ориентированное программирование и методы проектирования на основе компонентных моделей.

- Сети с таймингом. Современные сетевые технологии общего назначения, такие как TCP/IP, представляют собой технологии с «максимальными усилиями», для которых очень трудно добиться предсказуемости синхронизации. Однако были разработаны более специализированные сетевые методы, которым удалось эффективно применить во встроенных системах. К тому же, сетевые инновации могут кардинально изменить способ разработки распределенного программного обеспечения (систем) реального времени.

- Теория динамических систем. Системные теории сегодня являются либо чисто физическими (например, системы управления, обработка сигналов), либо чисто вычислительными (например, вычислимость, сложность). Появилось несколько смешанных теорий, включая гибридные системы и алгебры процессов. Более того, вместо сложности можно было бы проанализировать планируемость.

## Киберфизические системы как основа умных концепций

Киберфизические системы нашли свое широкое применение в таких концепциях, как умный город, умное электроснабжение, умное производство, умный дом. Также активно развиваются концепции умного транспорта, умного здравоохранения, умного общества, умного офиса, умных лабораторий, умных сетей и др.

### *Умный город*

Концепция подразумевает эффективное управление и обеспечение высокого уровня жизни населения, что достигается с применением инновационных технологий. От граждан и общественных устройств информация поступает в ЦОД (центр обработки данных), где затем обрабатывается и анализируется. Примерами элементов умного города могут быть умные парковки – для помощи водителям отыскать свободные места, умное освещение – для контроля яркости уличного освещения с целью экономии электроэнергии и умные светофоры – для анализа дорожных ситуаций и транспортных потоков и самостоятельного выбора режима работы на основе полученной информации<sup>2</sup>.

### *Умное электроснабжение*

Умное электроснабжение представляет собой комплекс модернизированных сетей, которые способствуют повышению эффективности, надежности, экономической выгоды, устойчивости производства и распределения электроэнергии [8]. Процессы осуществляются при помощи использования информационных и коммуникационных технологий по сбору и обработке данных. Так, компания Toshiba разработала свой проект виртуальной электростанции. Киберфизическая система координирует работу распределенных источников энергии, потребляющих ее транспортных средств и хранения/накопления энергии. В результате чего удастся оптимизировать энергопотребление системы и предсказать масштабы потребления, а значит добиться максимальной экономии электроэнергии<sup>3</sup>.

### *Умное производство*

Связь киберфизических систем с промышленностью активно развивается в направлениях сетевой энергетики, автомобилестроения, металлургии [9] и судостроения.

В производственной среде КФС включают в себя интеллектуальные машины, системы хранения данных и производственные мощности, способные автономно обмениваться информацией, инициировать действия и независимо контролировать друг друга. Эта концепция способствует повышению эффективности производственных процессов, участвующих во всей производственно-сбытовой цепочке, включая разработку, использование материалов, исходящую логистику и управление жизненным циклом. Устройства такого интеллектуального завода являются уникально идентифицируемыми, могут находиться в любом месте, знать свою собственную историю и текущее состояние, возможности конфигурации и производственные условия, а также обмениваться данными друг с другом даже без проводов. Данная концепция также предполагает возможность внесения изменений на производстве «в последнюю минуту» и гибкие ответы на прерывания в работе и сбои со стороны поставщиков [4].

### *Умный дом*

Умный дом позволяет автоматизировать и упростить управление различными встроенными системами и другим оборудованием квартиры или дома. Данная концепция включает в себя управление освещением – включение света по сигналу датчика движения, изменение варианта подсветки, дистанционное управление светом через смартфон; обеспечение безопасности – получение СМС и уведомлений при срабатывании охранной

---

<sup>2</sup> URL: <https://iot.ru/wiki/umnyy-gorod>.

<sup>3</sup> URL: <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/438262/>.

системы; обеспечение климат-контроля – система поддерживает температуру помещения на заданном уровне и позволяет изменять ее дистанционно, а также устанавливать режим максимальной экономии энергопотребления во время отсутствия хозяев [10]. Также при наличии в доме/квартире «умной» техники с модулем Wi-Fi возможно дистанционное управление этой техникой и планирование действий. Например, чайник может кипятить воду каждое утро перед уходом хозяина на работу, а стиральная машина стирать вещи к его приходу с работы.

### Заключение

Концепция киберфизических систем активно развивается и продолжает расширять области использования. В качестве относительно небольших объектов могут быть автоматизированы умные дома, офисы, транспорт, но также есть и крупные проекты, такие как умные города, промышленность. Все эти секторы имеют большое значение для общества. На сегодняшний день стоит задача не отставать от современных технологий, таких как Интернет вещей (в том числе киберфизические системы), большие данные, облачные вычисления, искусственный интеллект и др., поскольку эти технологии повышают качество жизни людей, их работы и производства.

Киберфизические системы охватывают множество различных отраслей, сотрудничество с которыми позволит сделать их важной производственной силой. Эти системы имеют огромный потенциал и способны изменить каждый аспект жизни людей, помочь решить критически важные проблемы общества, превзойти современные распределенные системы по таким критериям, как производительность, безопасность, надежность, эффективность, удобство использования.

Несмотря на невероятный потенциал, существующие КФС не совершенны и предстоит решить еще множество задач по устранению существующих в них проблем, таких как разнородность данных, надежность, конфиденциальность, безопасность и др. Устранив неполадки в этих аспектах, киберфизические системы выйдут на новый принципиально уровень полезности и эффективности.

Рассматривая степень влияния киберфизических систем на жизнь людей, можно смело сказать, что именно эта концепция вкупе с используемыми вместе с ней технологиями связана с переходом к индустрии 4.0.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юдина М.А. Индустрия 4.0: перспективы и вызовы для общества // Государственное управление. Электронный вестник. – 2017. – №60. – с. 197–215.
2. E.A. Lee, S.A. Seshia. A cyber-physical systems approach // Introduction to embedded systems. – 2011.
3. A.R. Al-Ali, Ragini Gupta, Ahmad Al Nabulsi. Cyber physical systems role in manufacturing technologies // AIP Conference Proceedings 1957. – 2018. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5034337>.
4. Martin Mikusz. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. – 2014.
5. Paulo Tabuada. Cyber-physical systems: Position paper. – University of California at Los Angeles. – 2010.
6. Rajesh Gupta. Programming models and methods for spatiotemporal actions and reasoning in cyber-physical systems // NSF Workshop on CPS. – 2006.
7. Edward A. Lee. Cyber-physical systems – Are computing foundations adequate? // NSF Workshop on cyber-physical systems: Research motivation, techniques and roadmap. – 2006.
8. Анисимов С.П. Умная сеть и «зеленая» экономика // Экономика и управление. – 2014. – №6. – с. 32–35.
9. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Синягов С.А. Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Том 4, №2. – с. 18–25.
10. Макаров Дмитрий. Что такое система умный дом и пример ее реализации // Заметки электрика. URL: <https://www.asutpp.ru/sistema-umnyj-dom.html> (дата обращения: 29.07.2020).

**Smyshlyaeva Anna Andreevna**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: anyac957@mail.ru

**Reznikova Kseniya Mikhailovna**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: a-da\_97@mail.ru

**Savchenko Denis Valerievich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: savchenko.dv@students.dvfu.ru

## Modern technologies in Industry 4.0 – cyber-physical systems

**Abstract.** With the advent of the Industry 4.0 concept, the approach to production automation has fundamentally changed. The manufacturing industry is based on such modern technologies as the Internet of Things, Big Data, cloud computing, artificial intelligence and cyber-physical systems. These technologies have proven themselves not only in industry, but also in various other branches of life. In this paper, the authors consider the concept of cyber-physical systems – systems based on the interaction of physical processes with computational ones.

The article presents a conceptual model of cyber-physical systems that displays its elements and their interaction. In cyber-physical systems, it represents five levels: physical, network, data storage, processing and analytics level, application level. Cyber-physical systems carry out their work using a basic set of technologies: the Internet of things, big data and cloud computing. Additional technologies are used depending on the purpose of the system. At the physical level, data is collected from physical devices. With the help of the Internet of Things at the network level, data is transferred to a data warehouse for further processing or processed almost immediately thanks to cloud computing. The amount of data in cyber-physical systems is enormous, so it is necessary to use big data technology and effective methods for processing and analyzing this data. The main feature of this technological complex is real-time operation.

Despite the improvement in the quality of production and human life, cyber-physical systems have a number of disadvantages. The authors highlight the main problems of cyber-physical systems and promising areas of research for their development. Having solved the listed problems, cyber-physical systems will reach a qualitatively new level of utility.

The paper also provides examples of the implementation of concepts such as a smart city, smart grid, smart manufacturing, smart house. These concepts are based on the principle of cyber-physical systems.

**Keywords:** cyberphysical system; Industry 4.0; Internet of Things; Big Data; smart city; smart grid; smart manufacturing; smart house