

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Сибирский государственный индустриальный университет»

ВК «Кузбасская ярмарка»



Посвящается 300-летию Кузбасса

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 7 - 2021

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2021. - № 7. – 400 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоемких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 1-4 июня 2021 г).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	211
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОМ ГЕОМАССИВЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ	213
Павлова Л.Д., Фрянов В.Н.....	213
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	213
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ	216
Фрянов В.Н., Исаченко А.А., Петрова О.А.....	216
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	216
ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКОМПЛЕКСНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	221
¹ Макаров Г.В., ¹ Мышляев Л.П., ¹ Саламатин А.С., ¹ Грачев В.В., ² Вдовиченко В.М.....	221
¹ ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия.....	221
² ООО «Омрон Электроникс», г. Москва, Россия	221
ЦИФРОВИЗАЦИЯ – ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ	225
¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ² к.т.н. Венгер К.Г., ³ к.т.н. Грачев В.В.	225
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	225
2 – ООО «РТ-СтройИнжиниринг», г. Москва, Россия	225
3 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	225
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ПОНЯТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	227
¹ Коровин Д.Е., ¹ к.т.н. Грачев В.В., ² д.т.н. Мышляев Л.П., ² Иванов Д.В., ² Кулюшин Г.А., ² Загидулин И.Р., ² Свинцов М.М., ² Макаров Г.В.	227
1 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	227
2 - Научно-исследовательский центр систем управления, г. Новокузнецк, Россия	227
МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАДРАТИЧНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЕГАЗАЦИОННЫХ И ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ	232
Колегов Г.А.....	232
Томский государственный университет, г. Томск, Россия	232
МЕТОДОЛОГИЯ УЧЁТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С ЦЕЛЬЮ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	238
Колегов Г.А.....	238
Томский государственный университет	238
г. Томск, Россия.....	238
РАЗРАБОТКА ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ В ВАГОНЕ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ ЕГО РАЗМОРОЗКИ.....	243
д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Калашников С.Н.	243
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	243
РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	246
д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Буинцев В.Н., к.т.н. Ермакова Л.А.	246
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	246
ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ АЭРОГАЗОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ	250
Дворянчиков М.В., д.т.н. Павлова Л.Д.....	250
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	250
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	253
Ефимов Н.Ю., Завьялов Ю. А., Свинцов М.М., Тишанинов Ю.Ю., к.т.н. А.В. Зимин	253
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	253
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ.....	258

щей подсистемой является человек-оператор. Поэтому рассматривать приходится человеко-машинную, а не чисто техническую систему.

Но и адекватной математической модели недостаточно, так как необходимы правила переноса результатов математического моделирования на объект-двойник, а это натуральный объект. И здесь нужна уже теория подобия. И если теория подобия достаточно хорошо развита для объектов управления, то для систем управления она находится в настоящее время только в зачаточном состоянии [9].

Второе. Построение цифровой модели еще не существующего объекта (аналитические модели) для целей создания принципиально новых технологий, систем управления и т.д. В этом случае также нужны правила перехода уже цифрового двойника к натурному. О направлении теории подобия такого рода даже и не говорится.

Вывод. При создании новых технологий, агрегатов, систем, как показывает многолетний опыт [10], более правильно ориентироваться на натурно-модельный подход, рационально интегрируя математические и физические модели, а также натурные элементы систем управления.

Список литературы

1. Данилов-Данильян В.И. Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. научных трудов, 2019. – С. 497 – 502.
2. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления // С.В. Емельянов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.
3. Емельянов С.В., Наппельбаум Э.Л. Основные принципы системного анализа // Проблемы научной организации управления социалистической промышленности; под ред. Д.М. Гвишиани, С.Е. Каменицера. – М., Экономика, 1974. – 751 с.
4. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 352 с.
5. Мышляев Л.П., Венгер К.Г. Вопросы цифровой экономики: состояние, проблемы. / Наука и профессиональное образование: национальные приоритеты и региональные драйверы развития : труды всерос. науч.-практ. конф. – Кемерово: ГБУ ДПО «ЕРИПО», 2019. – С. 82-83.
6. Лjung Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. – М.: Наука, Физматлит, 1991. – 432 с.
7. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
8. Колесников А.А. Теория синергетического управления. – Таганрог: ТГРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
9. Понятия и условия подобия систем управления / Л.П. Мышляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – №12. – С. 56-58.
10. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография. В 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

УДК 65.011.56:004.942

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ПОНЯТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

¹Коровин Д.Е., ¹к.т.н. Грачев В.В., ²д.т.н. Мышляев Л.П., ²Иванов Д.В., ²Кулюшин Г.А.,
²Загидулин И.Р., ²Свинцов М.М., ²Макаров Г.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
2 – Научно-исследовательский центр систем управления, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Статья посвящена особенностям применения технологии цифровых двойников в угольной отрасли. Приведены ключевые моменты и нюансы применения технологии в промышленности в целом и в угольной отрасли в частности.

Ключевые слова: цифровой двойник, автоматизация, модель, моделирование, угольная промышленность, натурно-математическое моделирование, подобие систем управления.

Вошедшее в моду словосочетание «цифровые двойники» требует более глубокого осмысления и увязки с многолетними достижениями по построению и применению моделей (моделированию), по комплексным натурно-математическим моделям, сочетающим в себе и математическую, и натурную составляющую, методам и системам управления с физической моделью, системным принципам синтеза систем управления с утверждениями принципиальной невозможности построить универсальную модель, с отражением поведения в человеко-машинных системах. Следует также более пристально изучить опыт применения математических моделей в различных отраслях промышленности. Иначе безудержный оптимизм от «цифровых двойников» приведет к разочарованиям, как уже не раз случалось в других сферах теории и практики. С этих позиций и сформирован представленный материал статьи.

Актуальность. Добыча угля является ведущим видом экономической деятельности Кемеровской области. Уровень развития угледобывающей отрасли в значительной степени предопределяет уровень развития экономики всего региона. Объемы добычи угля имеют долгосрочную положительную динамику, что требует ещё большей динамики развития отрасли переработки и обогащения. Стратегией социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года определено, что одно из перспективных направлений развития отрасли – это увеличение объемов переработки добываемого сырья. Увеличение общих объемов переработки предопределяет необходимость как модернизации существующих углеобогатительных комплексов, так и создание новых предприятий.

На текущий момент степень цифровизации горноперерабатывающей отрасли достаточно высока – внедрены системы автоматизированного управления, предполагающие, в том числе, оперативный контроль и долгосрочное хранение контролируемых параметров технологических процессов и оборудования [1-3]. Это может являться основой для создания цифровых теней предприятий, что, в свою очередь, служит «низким порогом входа» в цифровую экономику региона и страны в целом. Дальнейшим этапом интеграции является повсеместное создание и использование натурно-модельных цифровых двойников производств. Для некоторых отраслей производств разработаны и отлажены цифровые двойники типовых объектов. Необходимо разработать общие структуры и конкретные рекомендации по созданию и внедрению натурно-модельных цифровых двойников предприятий горной промышленности.

Понятие «цифровой двойник». Цифровой двойник (англ. Digital Twin) – это виртуальный, программный аналог физического изделия, группы изделий или процесса, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды, а также его работа заключается в сборе и повторном использовании цифровой информации [4].

Другая интерпретация цифрового двойника – это виртуальная модель, которая на микро- и макроуровне либо описывает реально существующий объект (выступая как дубль готового конкретного изделия), либо служит прототипом будущего объекта. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физического объекта, должна быть получена и на базе тестирования его цифрового двойника.

Становление понятия «цифровой двойник». До начала первой промышленной революции, которая началась в XVIII в., различные изделия в основном изготавливались ремесленниками – производство уникальных продуктов по единому шаблону. Однако с введением концепции взаимозаменяемых деталей в XVIII веке способ изготовления продукции быстро изменился, поскольку компании начали стремиться к созданию больших объемов копий своих изделий. В последнее время парадигма массовой персонификации направлена на объединение этих устоявшихся производственных концепций для достижения низких удельных затрат на индивидуальные продукты.

Однако, хотя такие производственные парадигмы допускают изготовление большого количества похожих деталей или изделий, эти экземпляры являются просто несвязанными копиями. В отличие от этого, идея создания двойника относится к созданию копии части или изделия целиком и использованию ее для описания других экземпляров – таким образом, устанавливая связь между несколькими копиями. Данная идея возникла из программы NASA Аполлон, «где были построены по крайней мере два идентичных космических аппарата, чтобы позволить зеркально отражать состояние космического аппарата во время полета» [5-6]. На рис. 1 показана реализация двойника в проекте «Аполлон».

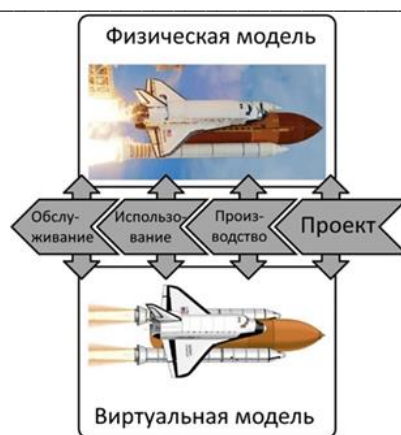


Рис. 1. Видение двойника на протяжении жизненного цикла изделия в проекте «Аполлон»

Кратко проследив историю развития концепции цифровых двойников, можно сказать, что с того момента, как человек начал создавать материальные изделия, он использовал виртуальные модели-двойники. Сначала он создавал их в своем воображении, потом на бумаге, затем в компьютере, а теперь и в «облаке», используя «умные» датчики, интернет вещей, искусственный интеллект. На каждом новом этапе в концепцию добавлялись новые цифровые технологии и методы моделирования, прогнозирования, анализа, обучения.

За последние десятилетия достижения в области компьютерных технологий позволили создавать все более сложные виртуальные модели физических объектов, а также проводить интеграцию таких моделей для проектирования систем. Эти модели не только служат для проверки и утверждения проекта, но и все чаще используются в качестве эталонной модели изделия. Более того, развитие микрочипов, сенсоров и информационных технологий привело к появлению умных продуктов, которые отслеживают и передают внешние параметры и, таким образом, позволяют «наполнить» модели данными о состоянии изделия, такими как условия окружающей среды и внешние воздействия на изделие [7-8].

Цифровой двойник основывается на реальной модели, а значит все показания двойник должен брать с реальных датчиков. Общая структура технологии «цифровой двойник» представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая структура технологии «цифровой двойник»

Получая показания с датчиков, можно задать входные возмущения на двойника. Учитывая это, можно проводить сравнение показаний реальных датчиков с датчиками цифрового двойника и, основываясь на этих показаниях, можно делать выводы о разногласиях и о причинах их возникновения.

Цифровой двойник содержит цифровую модель, характеристики материала, руководства и данные по проведению технического обслуживания продукта, информацию о влиянии внешних факторов.

Наиболее эффективным применением технологии цифровых двойников является её использование для продукции со следующими критериями:

- сопровождение продукции квалифицированным специализированным сервисом (контроль состояния, мониторинг, техническое сопровождение);
- длительный жизненный цикл изделия (от 5 до 70 лет);
- большое количество экземпляров установленного оборудования;
- широкий диапазон и многообразие условий эксплуатации;

– труднодоступность изделия для проведения обслуживания.

Это весьма обширный список критериев, под которые подпадает продукция из различных отраслей промышленности: технологические агрегаты угольных шахт и обогатительных фабрик, авиационные двигатели и системы, сложное промышленное оборудование, железнодорожные и автомобильные транспортные системы, медицинское оборудование [9-12].

Классификация цифровых двойников. В настоящий момент цифровые двойники находят своё применение во множестве отраслей промышленности, таких как угольная отрасль, энергетика, машиностроение. Основная причина применения цифровых двойников в данных отраслях – это цена ошибки. В каждой из перечисленных отраслей ошибка оператора, диспетчера или инженера может привести как к экономическому ущербу, так и к угрозе жизни и здоровья людей.

Сейчас распространена классификация, включающая три типа двойников: цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA).

DTP-двойник характеризует физический объект, прототипом которого он является, и содержит информацию, необходимую для описания и создания физической версии объекта. Эта информация включает требования к производству, аннотированную трехмерную модель, спецификацию на материалы, процессы, услуги и утилизацию.

DTI-двойники описывают конкретный физический объект, с которым двойник остается связанным на протяжении всего срока службы. Двойники этого типа обычно содержат аннотированную 3D-модель с общими размерами и допусками, спецификацию на материалы, в которой перечислены текущие и прошлые компоненты, спецификацию на процессы с перечислением операций, которые были выполнены при создании этого физического объекта, а также результаты любых тестов на объекте, записи о сервисном обслуживании, включая замену компонентов, операционные показатели, результаты тестов и измерений, полученные от датчиков, текущие и прогнозируемые значения параметров мониторинга.

DTA-двойники определяются как вычислительная система, которая имеет доступ ко всем цифровым двойникам-экземплярам и может посылать им запросы в режиме случайных или проактивных опросов.

Симбиоз с технологиями интернета вещей является драйвером для развития технологий цифровых двойников. Цифровые двойники получают реальные данные с датчиков, осуществляющих мониторинг реальных объектов, в то время как интернет вещей обеспечивает сбор и анализ данных с различного рода сенсоров и позволяет сделать этот процесс экономичным и эффективным.

Методы реализации цифровых двойников. Цифровые двойники производственных предприятий и протекающих в них процессов являются комплексным инструментом для планирования, оптимизации, поиска уязвимых мест и общего повышения эффективности управления. В общем понимании цифровые двойники создаются для уже существующих объектов и опираются на их информационное отображение, различные виды моделей и методы математического анализа. При этом выбор наиболее эффективных из них для каждого нового объекта возможен только по результатам сравнения после многочисленных экспериментов – то есть по факту уже совершенных ошибок.

Для некоторых отраслей производств разработаны и отлажены цифровые двойники типовых объектов. Однако полностью перенести уже готовую отлаженную систему на новый объект невозможно, поскольку даже несущественные на первый взгляд отличия могут стать причиной значительных отклонений и ошибок. Даже для аналогичных производств каждый раз требуется существенная доработка.

В первом случае известно, что обоснованный перенос управляющих решений возможен только в случае подобия систем управления. То есть необходимо развитие теории подобия систем управления от условий функционирования цифровых двойников [13]. Такие решения можно переносить с ранее разработанной системы, или же с физической (лабораторной или полупромышленной) модели. Как правило, для изучения технологии и режимов работы на новых производствах сначала разрабатываются физические или полупромышленные модели. Методы и основания для переноса полученных результатов исследований самих процессов описаны теорией подобия физических процессов, а развитие теории подобия для систем управления, во-первых, позволило обосновать перенос части управляющей системы, связав свойства моделей объектов управления,

внешних воздействий, законов регулирования, во-вторых, учесть системные особенности, обусловленные замыканием прямых и обратных управляющих связей.

Во втором случае целесообразно применять методы натурно-математического моделирования с использованием типопредставительных ситуаций, которые развивают общую концепцию натурно-модельного подхода, выработанного в научной школе в моделировании систем управления. Так как эти методы удовлетворяют жестким ограничениям на объем и качество априорной информации, присущим натурным действующим системам автоматизации управления, в частности, отсутствию адекватных математических моделей «в большом»; ограниченным возможностям проведения активных экспериментов на объектах в режимах их рабочей эксплуатации; минимальным сведениям о свойствах различного рода возмущений; непредвидимым возможным изменениям целей управления; замене компонентов сырых материалов; модернизации самих объектов управления в ходе эксплуатации и т.п.

В общем, видение цифрового двойника описывает видение двунаправленного отношения между физическим объектом и множеством его виртуальных моделей. В этом контексте установление отношений между физическими частями и их виртуальными моделями, позволяет эффективно осуществлять проектирование, производство, обслуживание и другие различные виды деятельности на протяжении всего жизненного цикла изделия (производства). В частности, при проектировании такие цифровые двойники позволяют проверить соответствие технических характеристик изделия общему замыслу и требованиям заказчика [9].

Однако, как сообщалось в научной литературе, так и на практике, нынешними ограничениями реализации цифрового двойника являются недостаточные возможности синхронизации между физическим и цифровым миром для установления замкнутых контуров, отсутствие высокоточных моделей для моделирования и виртуального тестирования в нескольких масштабах, отсутствие количественной оценки неопределенности для таких моделей, трудности прогнозирования сложных систем, а также проблемы сбора и обработки больших массивов данных. Действительно, эти проблемы могут быть решены только на основе прочной концептуальной основы и комплексной эталонной модели цифрового двойника.

Под натурно-модельным цифровым двойником понимается интегрированный в натурную (или физическую) систему управления натурно-модельный комплекс, отображающий ее функционирование в цифровой форме.

Выводы. Создание новых и совершенствование действующих систем автоматизации управления производственными объектами подразумевает, в том числе, повышение уровня цифровизации для их интеграции в современную среду цифровой экономики. Одним из основных инструментов для этого являются цифровые двойники. Однако на данный момент слабо разработаны научно-практические основы создания общих структур как цифровых двойников, так и комплексных натурных систем автоматизации управления, их конкретизации в производственной, образовательной и научной деятельности. При решении этой проблемы целесообразно ориентироваться на натурно-модельный подход, эффективность которого подтверждена многолетней теоретической и практической проверкой при автоматизации управления в горной и металлургической отраслях промышленности.

Практически все исследователи сходятся о назначении цифровых двойников – повышение эффективности бизнеса или производства. Для этого основной акцент делается на материальные потоки всего предприятия, не раскрывая суть происходящих внутри технологических процессов и процессов управления, происходящих в локальных системах и контурах.

Цифровые двойники могут стать полезным инструментом. Они позволяют совершенствовать операции технического обслуживания и упрощают техническую поддержку изделия, экономят деньги, уменьшая число сбоев и продлевают срок службы оборудования. Цифровой двойник может служить источником натурных данных для дальнейшего исследования, без необходимости доступа к реальному объекту, так как доступ к реальному объекту зачастую затруднен по соображениям безопасности объекта, так или его территориальной удаленности.

Список литературы

1. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода. В 3 томах. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения / под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
2. Сазыкин Г.П., Синеев Б.А., Мышляев Л.П. Проектирование и строительство углеобогатительных фабрик нового поколения. – Новокузнецк: СибГИУ. 2003. – 127 с.

3. Использование BIM-технологий при проектировании автоматизированных промышленных комплексов / В.В. Грачев [и др.] // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. третьей всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2020. – С. 86-94.
4. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
5. Rosen R, von Wichert G, Lo G, Bettenhausen K.D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing // IFAC-Papers OnLine. – 2015. – 48(3) – P. 567–572.
6. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Structural Dynamics and Materials Conference: proceedings of the 53rd AIAA Structures, 2012. – P. 1818.
7. Digital Twin: перспективы использования цифровых двойников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nfp2b.ru/2019/01/09/digital-twin-perspektivy-ispolzovaniya-tsifrovyyh-dvoynikov/>.
8. Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В. Цифровизация и управление // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2019: тр. XII всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. – С. 29–31.
9. Данилов-Данильян В.И. Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. науч. трудов. – Москва: Студия Ф1, 2019. – С. 497-502.
10. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли / В.Н. Быкова [и др.] // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – Вып. 1 (28). – С. 8..
11. Еремин Н.А., Еремин Ал.Н. Цифровой двойник в нефтегазовом производстве // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 12. – С. 14–17.
12. Кокорев Д.С. Посмаков Н.П. Применение «цифровых двойников» в производственных процессах // Colloquium-journal. – 2019. – № 26-2 (50). – С. 71–78.
13. Оценивание подобия систем управления / Г.В. Макаров [и др.] // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды седьмой науч.-практ. конф. – Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2016. – С. 170 – 177.

УДК 532.5.013.12

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАДРАТИЧНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЕГАЗАЦИОННЫХ И ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Колегов Г.А.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Разработана методология расчёта квадратичных аэродинамических сопротивлений дегазационных и газоотсасывающих трубопроводов, произведена верификация предлагаемой математической модели с использованием средств вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова: дегазация, дегазационный трубопровод, аэродинамическое сопротивление, шахтная вентиляционная система, полиномиальная интерполяция, cfd моделирование.

Дегазация является аэродинамическим процессом, расчеты которого до настоящего времени не проводятся, так как ее трубопроводная сеть не включена в действующие модели шахтных вентиляционных сетей (ШВС). Одной из главных причин является отсутствие явной методологии вычисления аэродинамических сопротивлений трубопроводов. В практике прикладной гидродинамики, а также согласно «Инструкции по дегазации» [1] расчёт потерь давления в трубопроводе производится по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2D} \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; V – скорость потока, м/с; D – диаметр трубопровода, м; λ – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления представляет собой отношение потерянного полного давления, осреднённого по массовому расходу, к динамическому давлению в условленном сечении [2]. Согласно инструкциям [1, 3] коэффициент сопротивления зависит от скорости потока и диаметра трубопровода, или от числа Рейнольдса, вычисляемого в соответствии:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (2)$$

Научное издание

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Под общей редакцией профессора В.Н. Фрянова

Компьютерная верстка Л.Д. Павловой

Подписано в печать 24.05.2021 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 23,76 Уч.-изд. л. 25,16 Тираж 1000 экз. Заказ

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ