

**КАК ССЫЛАТЬСЯ НА СТАТЬЮ / HOW TO CITE:**

**Кожухов Ю.В., И.В. Ильин, А.А. Аксенов, А.А. Лебедев, Р.С. Марченко  
Архитектурный подход к управлению технологическими процессами  
компрессорных станций с установками подготовки газа низкотемпературной  
сепарацией на основе цифрового двойника, Журнал: Газовая промышленность. №3.  
2020. Издатель ООО «Камелот Пабблишинг». С. 24 – 30.**

**АРХИТЕКТУРНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ С УСТАНОВКАМИ  
ПОДГОТОВКИ ГАЗА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ  
ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

**Ю.В. Кожухов**, к.т.н., ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого» (Санкт-Петербург, РФ)

**И.В. Ильин**, д.э.н., ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»

**А.А. Аксенов**, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого»

**А.А. Лебедев**, к.т.н., ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»

**Р.С. Марченко**, к.э.н., ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет»

На современных предприятиях все чаще возникает потребность в применении так называемых цифровых двойников – оцифрованных моделей объекта (процесса) или комплекса объектов (процессов) с высокой степенью детализации. Цифровой двойник позволяет значительно экономить ресурсы на тестирование гипотез: с его помощью можно определять оптимальные условия и повышать эффективность технологических процессов без проведения натурных испытаний. Одно из ключевых отличий цифровых двойников от обычных математических моделей – это объемная матрица входных изменяемых параметров, по которым максимально корректно рассчитываются выходные данные, например, решаются задачи поиска оптимальных конфигураций исследуемого прототипа.

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

В данной статье описаны возможности цифровых двойников, проблемы и перспективы их интеграции с системами высокотехнологичного предприятия на примере газокompрессорной станции высокого давления и установки подготовки газа низкотемпературной сепарацией нефтегазового предприятия с использованием архитектурного подхода. Обоснована целесообразность применения архитектурного подхода при разработке и внедрении цифровых двойников, представлены рекомендации относительно местоположения цифрового двойника в архитектуре информационных систем производственного предприятия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК, АРХИТЕКТУРНЫЙ ПОДХОД, ГАЗОКОМПРЕССОРНАЯ СТАНЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.

В современных условиях рынок требует от высокотехнологичных компаний модернизации и совершенствования систем управления бизнесом. Цифровизация – это повсеместное внедрение цифровых технологий в разные сферы жизни: промышленность, экономику, образование, культуру, обслуживание и т.п.[1] Цифровизация позволяет повысить гибкость и конкурентоспособность производства. Данные на сегодняшний день – это актив, который помогает грамотно выстраивать и автоматизировать технологические процессы. В целях эффективного использования информации часто необходимо строить архитектуру данных, которая позволяет корректно интегрировать обработанные и очищенные данные и существующие ИТ-системы предприятий, создавая основу для принятия производственных и управленческих решений.

#### АРХИТЕКТУРНЫЙ ПОДХОД

Под архитектурным подходом в данной работе понимается набор принципов и методов, позволяющих обеспечить высокий уровень организации бизнес-процессов и ИТ-инфраструктуры на предприятии, а также достижение намеченных стратегических и операционных целей в выбранных видах деятельности на основе современных ИТ [2]. Не всегда можно ограничиться модернизацией существующих бизнес-систем, в некоторых случаях целесообразно проводить их реинжиниринг и применять концептуально новые подходы. При этом важно добиться корректного взаимодействия всех элементов системы. Архитектурный подход базируется на принципах архитектуры предприятия, которая включает в себя три слоя [3]:

- бизнес-слой;
- ИТ-слой (приложения);
- технологический слой (технологическая и ИТ-инфраструктура).

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

Важнейшее качество эффективной архитектуры предприятия – это способность сохранять целостность всей системы при изменении ее отдельных частей. Архитектурный подход помогает внедрять информационные продукты и системы с максимальной отдачей, поскольку он позволяет выстроить уровень коммуникации между бизнесом и ИТ-сектором, при котором можно беспрепятственно моделировать, реализовать и интегрировать сбалансированные архитектурные решения. На крупных предприятиях достаточно сложно внедрить даже небольшие в рамках компании ИТ-продукты, поскольку они должны корректно и эффективно взаимодействовать с существующими системами. Поэтому первоначально нужно проектировать организацию и структуру данных, которые эти продукты будут обрабатывать и предоставлять на выходе, а также продумать, каким образом и в какие системы будут поступать выходные данные, как они будут агрегироваться и анализироваться в рамках существующих систем. Именно эти задачи успешно реализуются при помощи архитектурного подхода.

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

Высокотехнологичные компании промышленного сектора применяют цифровые двойники (ЦД) – высоко детализированные модели реальных объектов и их свойств – для эффективного тестирования гипотез, прогнозирования значений требуемых показателей при заданных условиях, решения различных задач, в частности поиска оптимальных конфигураций. Однако недостаточно разработать ЦД, необходимо его встроить в действующие на предприятии системы. Для этого часто приходится проводить реинжиниринг бизнес-процессов и изменять организационную структуру предприятия. Именно по этим причинам в процессе создания ЦД технологического процесса прежде всего следует [4]:

- сформулировать цели создания ЦД;
- создать модель существующих бизнес-процессов, в рамках которой будет использован ЦД;
- определить назначение получаемых выходных данных ЦД и вписать их в существующие бизнес-процессы;
- скоординировать действия пользователей входных и выходных данных, пересмотреть бизнес-функции и организационную структуру подразделений технологического блока.

Цифровые двойники создаются, прежде всего, для экономии времени, трудовых и материальных ресурсов. Они способны в режиме реального времени генерировать сотни тысяч различных связанных с прототипом сценариев в зависимости от поставленной задачи. Например, на немецких предприятиях за последние семь лет за счет применения

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

ЦД количество испытаний в натуральных условиях сократилось в 50 раз [5], а количество вовлеченных в них людей – более чем на порядок. Также изменилась и структура персонала вследствие возросшей потребности в услугах аналитиков-расчетчиков.

На сегодняшний день ЦД становятся все сложнее: наряду с симуляцией изделия или отдельного вида оборудования возникают ЦД целых секторов или участков производства, охватывающие всю внутреннюю экосистему технологических процессов. В процессе эволюции ЦД возникают следующие проблемы:

- интеграция новых приложений ЦД и существующих систем;
- определение ответственного и принимающего решения лица в области взаимодействия с ЦД;
- повышение эффективности использования выходных данных ЦД, поиск оптимального решения и др.

#### АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ, ВКЛЮЧАЮЩАЯ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК

При создании ЦД технологического процесса целесообразно базироваться на принципах архитектурного подхода, что подразумевает комплексную интеграцию ЦД в ИТ-архитектуру предприятия. Эффективное управление технологическими процессами на основе сбора и анализа данных подразумевает [6]:

- формирование требований к структуре входных и выходных данных;
- регламентирование способов их сбора, обработки, анализа;
- определение управленческих воздействий и методов предиктивного или реактивного реагирования;
- выбор максимально эффективных параметров итерационного процесса при разных экспериментальных условиях внешней и внутренней среды.

Схема работы ЦД (рис. 1) предполагает сбор данных с датчиков оборудования, которые поступают через информационные системы уровня автоматизированных систем управления технологическими процессами, где эти данные обрабатываются для осуществления следующих функций управления:

- анализ выходных данных в режиме реального времени;
- подбор оптимальных параметров и конфигураций оборудования;
- прогнозирование необходимых конфигураций ЦД и выходных параметров;
- принятие управленческих решений на основе анализа и прогноза.

После этого информация поступает в системы уровня управления ресурсами компании и анализируются для принятия операционных решений по управлению финансовыми,

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

кадровыми и другими ресурсами предприятия. Далее агрегированные и обработанные данные направляются в информационную систему бизнес-аналитики, где рассматриваются на уровне топ-менеджмента компании для принятия стратегических решений.

В результате проведенного анализа полученных при помощи ЦД данных автоматически выставляется оптимальная конфигурация режимов работы реального оборудования на отдельных элементах станции и установки, а также принимаются решения о замене или оптимизации конструкции установленного оборудования [7, 8].

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

### КОМПРИМИРОВАНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В качестве примера реализации ЦД на предприятии нефтегазовой отрасли в настоящей статье приведена разработанная на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбПУ (КВиХТ) программа-симулятор газовой инфраструктуры [9]. Эта программа разработана на основании схемы, которая включает в себя трубные обвязки, основное и вспомогательное оборудование двух совместно (последовательно) работающих объектов газовой инфраструктуры – газокomppressorной станции высокого давления и установки подготовки газа низкотемпературной сепарацией. Трубопроводные обвязки составляют значительный массив элементов программы (помимо компрессорного, турбодетандерного, теплообменного, осушительного и сепарационного оборудования), которые функционируют на основе математической модели потерь в трубопроводах [10]. Для разветвленных и закольцованных участков сети применена специально созданная математическая модель распределения расходов. Работу компрессоров динамического и объемного действия симулируют отдельные программные модули, основанные на функциях характеристик используемых компрессоров. Эти характеристики были получены в ходе натурных экспериментов, с помощью математического моделирования в собственных программных продуктах кафедры КВиХТ, а также с помощью CFD (computational fluid dynamics) в программном комплексе Ansys CFX. Функционирование сепарационного и теплообменного оборудования представлено математическими моделями вспомогательного оборудования. В программе помимо основных присутствуют дополнительные модули, отвечающие за открытие и закрытие различной запорной и регулирующей арматуры, которые позволяют изменять режим работы станции и определить оптимальные степень открытия клапанов и способ эксплуатации оборудования.

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

### *Требования к цифровому двойнику*

К ЦД выдвигаются три основных требования:

- к входным и выходным данным;
- к структуре;
- к программному обеспечению согласно [11].

Преобразованная в формат SVG (scalable vector graphics) схема объектов симуляции полностью интерактивна, ее каждый элемент имеет собственные свойства. Одни элементы системы предназначены только для визуального вывода данных (участки трубопроводов или вспомогательное оборудование, которые не имеют опциональных функций регулирования); другие элементы – как для вывода так и для ввода данных (компрессорное, вспомогательное оборудование и регулирующая арматура).

Пример интерфейса ЦД представлен на рис. 2.

### *Ввод данных*

Входные данные можно разделить на несколько категорий, в которые входят параметры:

- окружающей среды;
- одного или нескольких входов рабочей среды;
- механического регулирования объектов моделируемой сети;
- сети и ее элементов (для оптимизации проектных решений);
- выходной сети.

Первые четыре категории данных реализованы в программе – симуляторе газовой инфраструктуры в виде прямой задачи моделирования (по входным параметрам расчет параметров выхода). Пятая категория регулирования с вводом параметров выходной сети – наиболее сложная, она представляет собой ЦД, максимально приближенный к реальному объекту газовой инфраструктуры (обратная задача).

### *Вывод данных*

Объем выводимых данных представлен несколькими категориями:

- термогазодинамические параметры среды;
- конструктивные параметры сети и ее элементов;
- расчетные параметры энергопотребления;
- расчетные параметры эффективности и надежной работы оборудования.

На реальном объекте невозможно измерять термогазодинамические параметры среды на протяженности всей газопроводной сети объекта: анализ проводится только в контрольных точках (вход и выход) основного и вспомогательного оборудования, а также на выходе из обособленных участков станции. Поэтому вывод данных ЦД можно

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

ограничить вышеперечисленными реперными точками системы, что упрощает возможность валидации ЦД на объекте исследования.

#### *Дополнительные возможности интерфейса*

Реализованные возможности:

- вывод основных термодинамических параметров с цветовой индикацией в заданном промежутке значений (наглядная визуализация);
- построение графиков эффективности работы оборудования;
- ввод входных параметров регулирования системы из файла;
- сохранение измененных параметров регулирования системы в файле с возможностью дальнейшей загрузки.

Возможности, реализуемые в целях цифровизации:

- сохранение всех результатов моделирования в базу данных;
- анализ и оптимизация результатов по различным критериям (экономическая эффективность, ресурс и др.);
- внедрение результатов оптимизации в процесс моделирования.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ КОМПРИМИРОВАНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ

Ключевые модели работы сети основаны на определении потерь давления и температуры на ее участках (первая и вторая модели) и термодинамических параметров рабочей среды (третья модель). Четвертая (модель расходной составляющей) служит для определения параметров параллельного распределения нескольких потоков рабочей среды (разветвление, слияние и регулирование расходной составляющей потока на участках параллельной и последовательной работы). Остальные модели предназначены для описания индивидуальной работы сложных элементов, они базируются на физических и математических законах и результатах исследований [12, 14].

#### *Ключевые модели работы*

Потери давления определяются по уравнению Дарси – Вейсбаха, описывающему потери напора или давления при развитом турбулентном течении несжимаемой жидкости на гидравлических сопротивлениях. Потери температуры учитываются согласно условиям теплообмена между турбулентным потоком рабочей среды и внешним ламинарным потоком воздуха через стенку металлического трубопровода и теплоизоляционный слой различных видов и толщины. Термодинамические свойства рабочей среды рассчитываются с использованием уравнения состояния Бенедикта – Вебба – Рубина и его модификаций [13] для определения:

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)



MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

- процесса и его свойств от входных и выходных параметров;
- выходных параметров для случая изоэнтальпийного процесса;
- выходных параметров при политропном процессе.

#### *Модель расходной составляющей потока рабочей среды*

Работа математических моделей распределения расхода потока рабочей среды по разветвленным участкам сети [15] (рис. 3, 4) представлена в виде многоступенчатого итерационного расчета, основанного на методе градиентного спуска. Условие остановки вычислений – равенство потери давления по всем отдельным параллельным направлениям. В качестве первого приближения вводятся расходная составляющая по каждому направлению и неизменность суммы расхода по всем направлениям. Для работы математической модели распределения расходов используется система уравнений, основанная на схемах рис. 3, 4. В качестве иллюстрации для схемы параллельного распределения с регулируемым сопротивлением (рис 3а) приведен алгоритм расчета на языке программирования Java в допустимом для данного объекта приближении постоянства температуры на всем участке (программный код):

```
// Старт функции и исходные данные //  
function mass flow distribution (M,Pn,Tn,Pipe,Valve)  
{  
    // Первое приближение и определение потерь через функцию участка //  
    let dP1=f.pipe(Pn,M,Tn,Pipe1);  
    let dP2=f.pipe(Pn-dP1,M/2,Tn,Pipe2);  
    let dP3=f.pipe(Pn-dP1,M/2,Tn,Pipe3);  
  
    let dPx1=f.valve(Pn-dP1-dP2,M/2,Tn,Valve1);  
    let dPx2=f.valve(Pn-dP1-dP3,M/2,Tn,Valve2);  
  
    let dP4=f.pipe(Pn-dP1-dP2-dPx1,M/2,Tn,Pipe4);  
    let dP5=f.pipe(Pn-dP1-dP2-dPx2,M/2,Tn,Pipe5);  
    let dP6=f.pipe(Pn-dP1-dP2-dPx1-dP4,M,Tn,Pipe6);  
    let it=0;  
    while( логическое_выражение_входа_в_цикл ) {  
        // Тело цикла //  
        it=it+1;  
        let dPsum1=Math.abs(dP1+dP4+dPx1);
```

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)



```

let dPsum2=Math.abs(dP2+dP5+dPx2);
let dPsr=(dPsum1+dPsum2)/2;
M1=Math.abs(M1+(dPsr-dPsum1)/dPsr1); // Простой спуск //
M2=M-M1;
if (условие выхода из цикла)
    {break}
}
// Определение искомых величин и их вывод //
let Pk=Pn-dP1-dP2-dPx1-dP4-dP6;
let Tk=Tn;
return [Pk:Pk,Tk:Tk,M1:M1,M2:M2]
}

```

Полученные модели регулирования требуют правильного соотношения регулирующего влияния и коэффициента сопротивления ( $\zeta$ ). Все элементы регулирования имеют запрограммированную функцию  $\zeta = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $x$  – величина регулирования, у одного элемента  $x$  может быть одна или более. В случае дальнейшего развития возможностей математической модели величины регулирования для объекта цифровизации будут подбираться на основании задаваемых критериев оптимизации. Подобранные величины регулирования можно направлять с виртуального симулятора на реальный объект в виде аналогового сигнала.

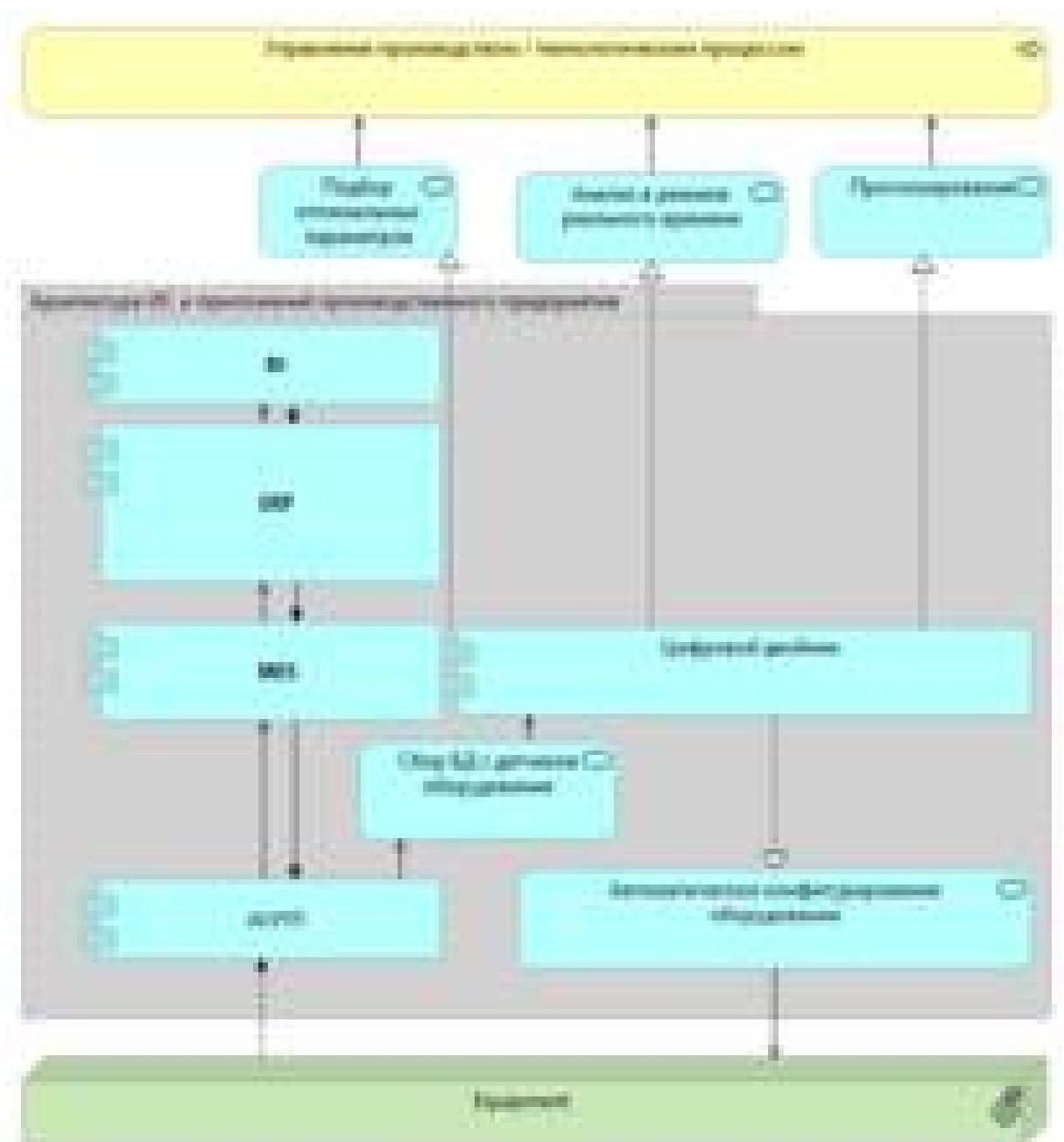
## ВЫВОДЫ

Цифровой двойник в качестве неотъемлемой части производственного процесса предприятия должен разрабатываться и внедряться как системный и комплексный проект. Проекты такой высокой сложности целесообразно реализовывать с использованием архитектурного подхода, поскольку в высокоуровневые и многомерные организационные структуры крупных производственных предприятий трудно встраивать новые процессы. Применяя архитектурный подход, можно добиться качественной интеграции ЦД с существующими информационными системами и повысить эффективность его применения в условиях предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулагин В., Сухаревски А., Мефферт Ю. Digital@Scale: Настольная книга по цифровизации бизнеса, ISBN:9785604232071/изд. Интеллектуальная Литература 2019, 293 с.
2. Gareis R. Happy Projects. MANZ'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung GmbH, Vienna, 2005. 657 p.
3. Lankhorst M. Enterprise architecture at work: Modelling, communication and analysis. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 338 p.
4. Majstorovic Milosav N., Terzic Rajko M. Enterprise architecture as an approach to the development of Information systems // Vojnoteh. glas. 2018. №2.
5. Ilin, I., Levina, A., Lepekhin, A., Kalyazina, S. Business Requirements to the IT Architecture: A Case of a Healthcare Organization (2019) Advances in Intelligent Systems and Computing, 983, pp. 287-294.
6. Levina, A.I., Borremans, A.D., Burmistrov, A.N. Features of enterprise architecture designing of infrastructure-intensive companies (2018) Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2018: Innovation Management and Education Excellence through Vision 2020, pp. 4643-4651.
7. Ваняшов А.Д., Карабанова В.В., Сорокин М.А. Технико-экономическое обоснование замены СПЧ на сеноманских ДКС Уренгойского месторождения.//Компрессорные технологии. №1/2019. С.30-33.
8. Рахманина Л.А., Аксенов А.А. Исследование влияния неравномерного распределения абсолютной скорости потока на входе в осерадиальное рабочее колесо центробежного компрессора с применением методов численного моделирования в Ansys CFX.//Компрессорные технологии. №2/2019. С.18-24.
9. Биктимиров А.А., Аксенов А.А., Кожухов Ю.В. Создание «цифрового двойника» объектов газовой инфраструктуры Ванкорского месторождения.// Сборник трудов 21-ого ежегодного международного промышленного симпозиума «Компрессоры и компрессорное оборудование» им. К.П. Селезнева. 2019. 163 с.
10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992. 672 с.
11. <http://docs.cntd.ru/document/gost-34-602-89> [дата обращения: январь 2020 г.]
12. Yablokov A., Yanin I., Danilishin A., Zuev A. Ansys CFX numerical study of stages centrifugal compressor with low-flow rate coefficient, in: MATEC Web of Conferences, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824509002>.

13. Sokolov M., Sadovsky N., Zuev A., Gileva L., Nguyen M.H., Real gas state equations comparative analysis for low-temperature calculations, in: E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914005007>.
14. Gileva L., Kartashov S., Zuev A., Ivanov V. Verification of the CFD calculation for the centrifugal compressor medium flow model stages with the help of supercomputer, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824509011>.
15. Блейхер И.Г., Лисеев В.П. «Компрессорные станции» - М.: Машгиз, 1959. 309 с.



MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

Управление производством / технологическим процессом

Подбор оптимальных параметров

Анализ в режиме реального времени

Прогнозирование

Архитектура информационной системы и приложений производственного предприятия

BI

ERP

MES

Цифровой двойник

Сбор базы данных с датчиков оборудования

Автоматизированная система управления технологическими процессами

Автоматическое конфигурирование оборудования

Оборудование

BI – бизнес-аналитика

ERP – системы уровня управления ресурсами компании

MES – системы управления производственными процессами

Рис. 1. Цифровой двойник в архитектуре информационной системы

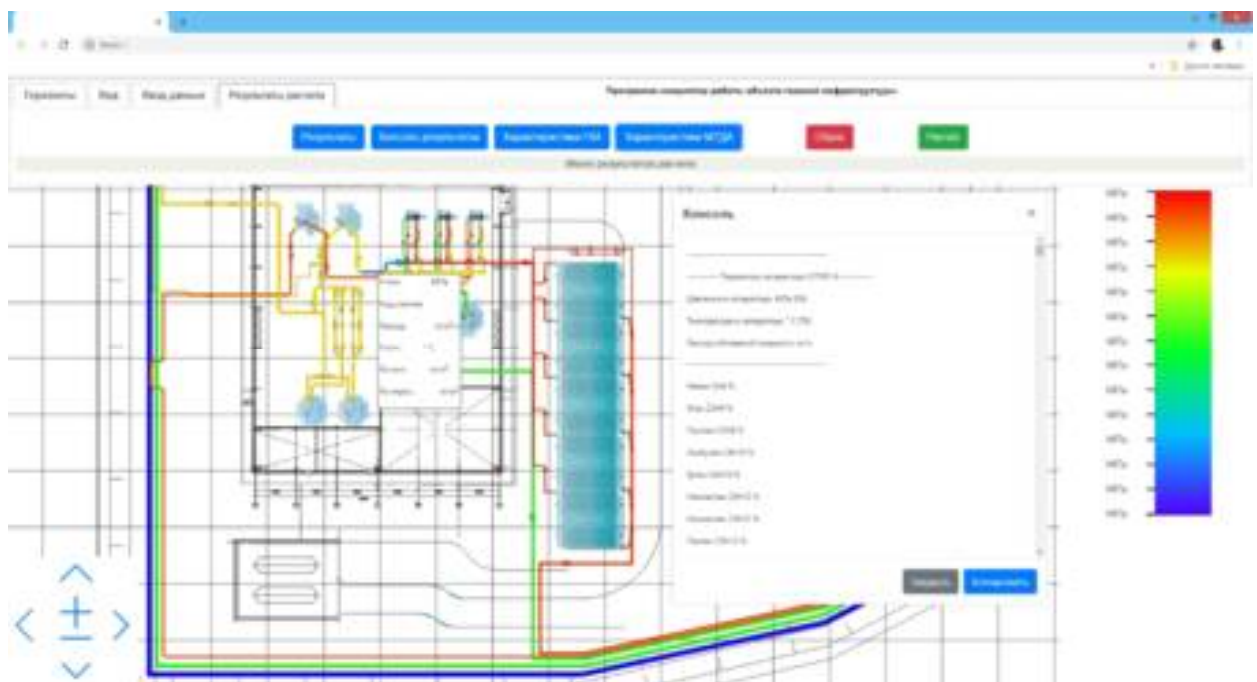
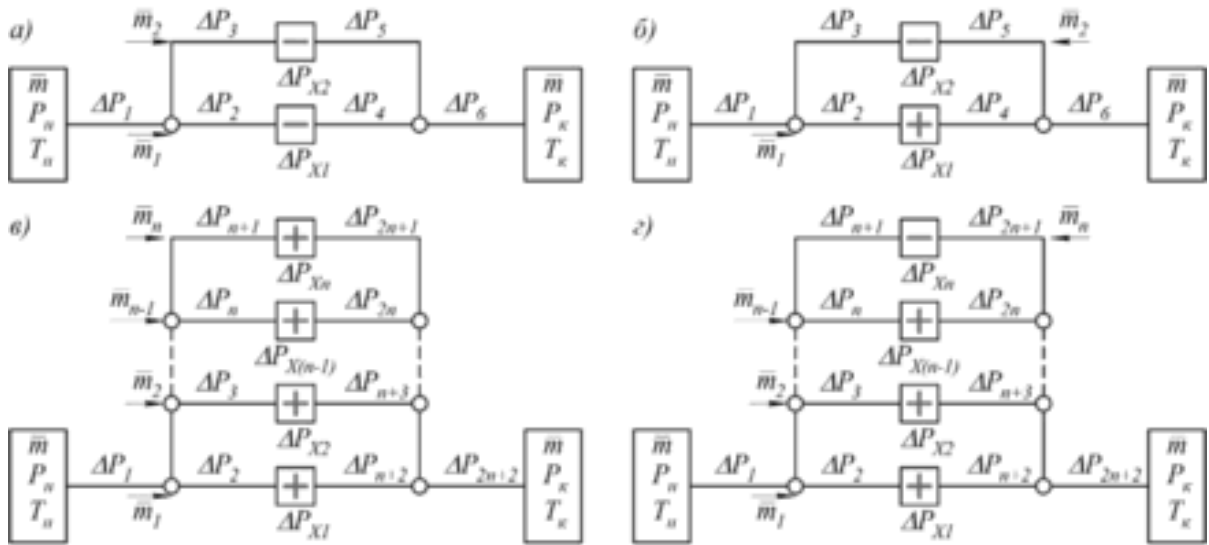


Рис. 2. Интерфейс цифрового двойника [98]

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)

БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)



a)

a)

$\bar{m} P_n T_n \Delta P_1 \bar{m}_2 \bar{m}_1 \Delta P_3 \Delta P_2 \Delta P_{X2} \Delta P_{X1} \Delta P_5 \Delta P_4 \Delta P_6 \bar{m} P_k T_k$

б)

б)

$\bar{m} P_n T_n \Delta P_1 \bar{m}_1 \Delta P_3 \Delta P_2 \Delta P_{X2} \Delta P_{X1} \Delta P_5 \Delta P_4 \bar{m}_2 \Delta P_6 \bar{m} P_k T_k$

в)

в)

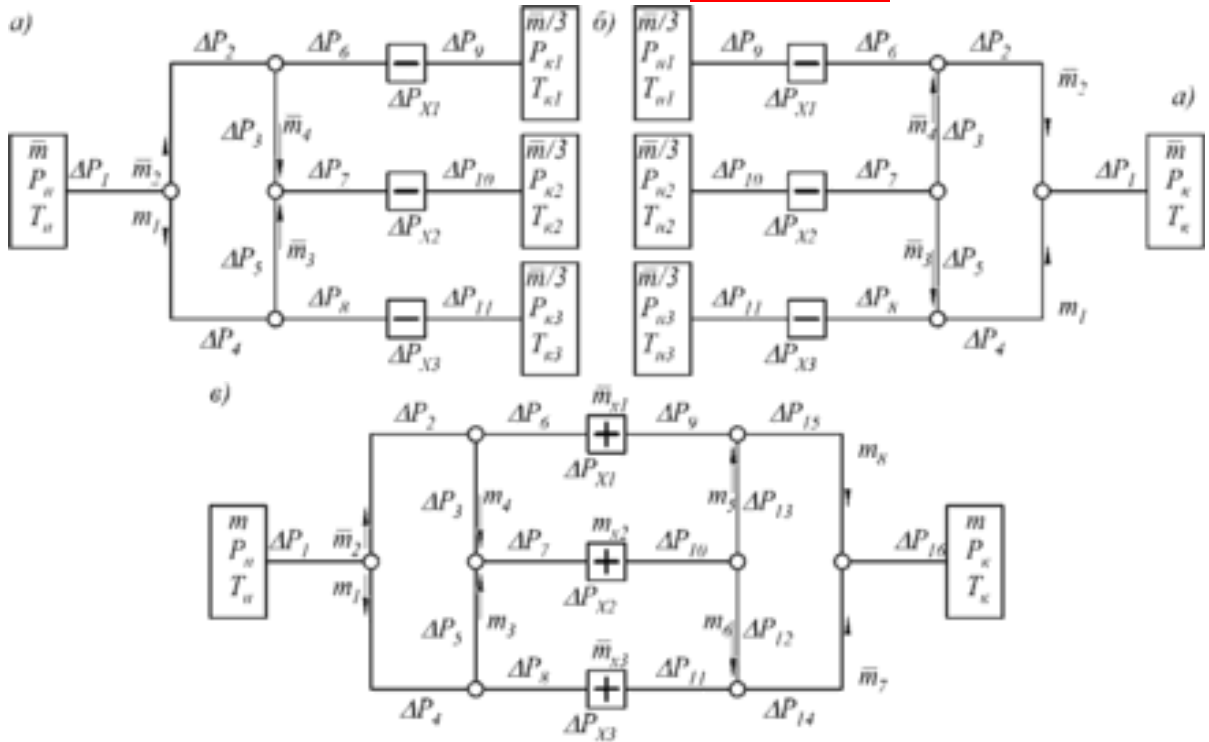
$\bar{m} P_n T_n \Delta P_1 \bar{m}_n \bar{m}_{n-1} \bar{m}_2 \bar{m}_1 \Delta P_{n+1} \Delta P_n \Delta P_3 \Delta P_2 \Delta P_{Xn} \Delta P_{X(n-1)} \Delta P_{X2} \Delta P_{X1}$   
 $\Delta P_{2n+1} \Delta P_{2n} \Delta P_{n+3} \Delta P_{n+2} \Delta P_{2n+2} \bar{m} P_k T_k$

г)

г)

$\bar{m} P_n T_n \Delta P_1 \bar{m}_{n-1} \bar{m}_2 \bar{m}_1 \Delta P_{n+1} \Delta P_n \Delta P_3 \Delta P_2 \Delta P_{Xn} \Delta P_{X(n-1)} \Delta P_{X2} \Delta P_{X1}$   
 $\Delta P_{2n+1} \Delta P_{2n} \Delta P_{n+3} \Delta P_{n+2} \Delta P_{2n+2} \bar{m} P_k T_k$

Рис. 3. Схемы параллельного распределения расхода: а) с регулируемым сопротивлением; б) с регулируемым сопротивлением и повышением давления; в)  $n$ -участков с повышением давления; г)  $n$ -участков с повышением давления и одним регулируемым сопротивлением



a)

a)

$\bar{m}$   $P_n$   $T_n$   $\Delta P_1$   $\bar{m}_2$   $\bar{m}_1$   $\Delta P_2$   $\Delta P_3$   $\Delta P_5$   $\Delta P_4$   $\bar{m}_4$   $\bar{m}_3$   $\Delta P_6$   $\Delta P_7$   $\Delta P_8$   $\Delta P_{X1}$   $\Delta P_{X2}$   $\Delta P_{X3}$   
 $\Delta P_9$   $\Delta P_{10}$   $\Delta P_{11}$   $\bar{m}/3$   $P_{k1}$   $T_{k1}$   $\bar{m}/3$   $P_{k2}$   $T_{k2}$   $\bar{m}/3$   $P_{k3}$   $T_{k3}$

б)

b)

$\bar{m}$   $P_k$   $T_k$   $\Delta P_1$   $\bar{m}_2$   $\bar{m}_1$   $\Delta P_2$   $\Delta P_3$   $\Delta P_5$   $\Delta P_4$   $\bar{m}_4$   $\bar{m}_3$   $\Delta P_6$   $\Delta P_7$   $\Delta P_8$   $\Delta P_{X1}$   $\Delta P_{X2}$   $\Delta P_{X3}$   
 $\Delta P_9$   $\Delta P_{10}$   $\Delta P_{11}$   $\bar{m}/3$   $P_{n1}$   $T_{n1}$   $\bar{m}/3$   $P_{n2}$   $T_{n2}$   $\bar{m}/3$   $P_{n3}$   $T_{n3}$

в)

c)

$\bar{m}$   $P_n$   $T_n$   $\Delta P_1$   $\bar{m}_2$   $\bar{m}_1$   $\Delta P_2$   $\Delta P_3$   $\Delta P_5$   $\Delta P_4$   $\bar{m}_4$   $\bar{m}_3$   $\Delta P_6$   $\Delta P_7$   $\Delta P_8$   
 $\bar{m}_{x1}$   $\Delta P_{X1}$   $\bar{m}_{x2}$   $\Delta P_{X2}$   $\bar{m}_{x3}$   $\Delta P_{X3}$   $\bar{m}_5$   $\bar{m}_6$   $\Delta P_{15}$   $\Delta P_{13}$   $\Delta P_{12}$   $\Delta P_{14}$   $\bar{m}_8$   $\bar{m}_7$   $\Delta P_{16}$   
 $\bar{m}$   $P_k$   $T_k$

Рис. 4. Схемы кольцевого распределения расхода: а) входной кольцевой коллектор с регулируемым сопротивлением; б) выходной кольцевой коллектор с регулируемым сопротивлением; в) схема подключения через кольцевые коллекторы трех участков с повышением давления

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)  
БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)

MORE ABOUT COMPRESSOR TECHNOLOGY AT [WWW.KVIHT.COM](http://WWW.KVIHT.COM)  
БОЛЬШЕ О КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ СМОТРИТЕ НА [WWW.KVIHT.RU](http://WWW.KVIHT.RU)