

УДК 05.10.000

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ, СОЗДАННЫХ НА БАЗЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ, ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

И. И. Витвинова¹, А. Ф. Атнабаев²

¹Inna.Vitvinova@yandex.ru, ²aaf1981@mail.ru

^{1, 2} ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной статье осуществляется анализ возможности применения цифровых двойников для оценки эффективности работы системы отопления за счет информационной поддержки принятия решений (ИППР).

Ключевые слова: информационные технологии; цифровой двойник; чертежи; тепловые ресурсы; проектирование; расчет системы отопления; тепловые потери помещения; мониторинг эффективности тепловых затрат.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире любая сфера деятельности человека сопровождается информационными технологиями (ИТ). Эффективность управления и функционирование предприятия в целом зависит от уровня цифровизации его бизнес-процессов, например, таких как – мониторинг процессов, упорядочивание ресурсов, множественная и быстрая манипуляция массивами данных. Любое крупное предприятие, как сложный объект, состоит из множества территориально-распределённых элементов и их инфраструктуры. Например, сложной системой является распределенная инженерная сеть системы теплоснабжения зданий и сооружений (далее – система отопления). От эффективности функционирования системы отопления объектов предприятия зависит не только комфортная рабочая обстановка, но и расходы на тепловые ресурсы. Чтобы проанализировать эффективность отопительной системы, используются разные методы. Для улучшения показателей разрабатывается комплекс решений, которые помогают руководителю оценить и проанализировать текущее состояние системы, а также спрогнозировать её развитие. Цифровые технологии позволяют иначе взглянуть на управление предприятием и адаптировать его бизнес-модель. Одним из примеров реализации таких технологий является применение геоинформационных систем (ГИС) и цифровых двойников, позволяющих анализировать территориально-распределенные разнотипные данные об энергопотреблении и прочих инженерных коммуникациях [1]. Комплексным примером использования современных технологий могут являться системы поддержки принятия решений (СППР), основанные на базе фундаментальных подходов, таких как структурно-функциональное моделирование SADT, объектно-ориентированное моделирование UML, информационное моделирование IDEF1X. При проектировании таких комплексных систем принято использовать теоретико-множественное описание объектов предметной области, позволяющее определить систему в терминах ее наблюдаемых свойств, выявить между ними взаимосвязи и обозначить их в виде математических выражений, что, в свою очередь, позволяет увидеть общую картину взаимодействия элементов системы [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Здания/сооружения и система отопления, как элементы крупного предприятия, состоят из множества разнотипных объектов, таких как инженерные сети трубопроводов со своими параметрами (длины, диаметра труб), конструкции помещений (толщина, высота и площадь стен, окон, тип стен) и другие. Следовательно, при анализе функционирования системы отопления необходима обработка данных о вышеперечисленных объектах, как элементах сложной системы. ГИС и цифровые двойники позволяют упростить процесс обработки данных об объектах, а также визуализировать их необходимые параметры в легко воспринимаемом виде, что в свою очередь может вывести на более качественный уровень процесс управления ими.

Цифровой двойник – это виртуальный аналог реального объекта или процесса, который имитирует его свойства, поведение и взаимодействие с окружающей средой. С его помощью предприятия могут быстрее обнаружить проблемы в бизнес-процессах или точнее предсказать их результаты. Элементы цифрового двойника зданий и сооружений базируются на оцифрованных поэтажных планах. После внедрения цифровых двойников затраты на вычисления анализируемых параметров зачастую снижаются, в то время как инструменты построения моделей продолжают развивать свои возможности. В каждой отрасли цифровые двойники имеют множество применений. Их использование позволяет получать информацию в режиме реального времени, осуществлять прогнозирование и обеспечивать информационную поддержку принятия решений исследуемых процессов. Обладая этими возможностями, предприятия за счет цифровизации становятся более эффективными [1].

Примером территориально-распределённого объекта, обладающего развитой и сложной инфраструктурой, может служить Уфимский университет науки и технологий (УУНиТ). УУНиТ является крупным ВУЗом республики Башкортостан и в составе имеет много зданий и сооружений (корпуса), которые, в свою очередь, оснащены системой отопления. Применение СППР для повышения эффективности решения повседневных задач за счет информационной поддержки производственных процессов является актуальной задачей для ВУЗа. Так, например, мониторинг систем отопления зданий является сложным и многофакторным, так как основан на ряде таких факторов как поддержание комфортной температуры в помещении, теплоотдача и иные особенности работы системы отопления [3]. Анализ разнотипной информации можно автоматизировать, применив для расчета цифровой двойник здания – трехмерную модель корпуса с необходимыми данными, которые можно использовать для ИППР.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИППР

Теоретико-множественный подход позволяет осуществить всесторонний анализ предметной области, в ходе которого выявить объекты взаимодействия системы и описать их. Всеми элементами цифрового двойника с точки зрения отопительного процесса являются регулирующая арматура, трубы, батареи и части здания, температура воздуха и температура теплоносителя. Описание всех элементов цифровых двойников необходимо для создания комплексных систем ИППР.

ИППР должна быть не просто подобием калькулятора, а инструментом, который автоматизирует процесс анализа отопительной системы за счёт расчёта и сохранения полученных данных в структурированном виде. Но для этого требуются не просто фундаментальные данные, а полная или упрощённая модель окончательного цифрового двойника [1].

Цифровой двойник, созданный на базе ГИС-технологий, представляет систему отопления как совокупность точек, линий и полигонов. В работе [2] представлен пример описания таких объектов в ГИС.

К точечным объектам в данной предметной области относится регулирующая арматура, которую можно объединить в отдельное множество U . Положение точечного объекта определяется координатами x , y и z одной точки в трехмерном пространстве. С учетом параметров регулирующей арматуры множество U будет иметь обозначение:

$$U = \{(x, y, z), Inv_U, Type_U, M_U, k_U, Type_{connectU}, T_{permU}, D_U, D_{startU}, D_{endU}\} \quad (1)$$

где (x, y, z) – координаты;

Inv_U – инвентарный номер арматуры;

$Type_U$ – тип арматуры;

M_U – материал;

k_U – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{м^2 \cdot \text{°C}}{Вт}$;

$Type_{connectU}$ – тип соединения арматуры;

T_{permU} – допустимая температура теплоносителя, °C;

D_U – диаметр, мм;

D_{startU} – дата начала эксплуатации арматуры;

D_{endU} – дата вывода арматуры из эксплуатации.

К линейным объектам относятся трубы для водяного отопления, которые можно объединить в отдельное множество P . Линейный объект определяется последовательностью координат x , y и z концов составляющих ее отрезков. С учетом параметров трубопровода множество P будет иметь обозначение:

$$P = \{(x, y, z)_m, L_P, D_P, M_P, \beta_P, T_{permP}\}, \quad m = \overline{1, n} \quad (2)$$

где (x, y, z) – координаты;

L_P – длина трубы, м;

D_P – диаметр трубы, мм;

M_P – материал;

β_P – поправочный коэффициент на статус трубы;

T_{permP} – допустимая температура теплоносителя в трубе, °C.

К полигонам относятся батареи для водяного отопления, которые можно объединить в отдельное множество H , и части здания, которые можно объединить в множество W . Полигональный объект определяется замкнутой линией, координаты начала и конца которой совпадают, и площадью. С учетом параметров батареи множество H будет иметь обозначение:

$$H = \{Lin_i, S_{polH}, Len_H, Type_H, Mod_H, J_{rad}, M_H, N_H, D_{startH}, D_{endH}\} \quad (3.1)$$

$$Lin = \{(x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_i\} : (x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_0 = (x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_n, \quad i = \overline{0, n} \quad (3.2)$$

где S_{polH} – площадь полигона батареи;

Len_H – периметр полигона батареи;

$Type_H$ – тип батареи, мм;

Mod_H – название модели батареи;

J_{rad} – количество секций радиатора;

M_H – материал;

N_H – мощность (теплоотдача) батареи, Вт;

D_{startH} – дата начала эксплуатации;

D_{endH} – дата вывода из эксплуатации.

С учетом параметров частей здания множество W будет иметь обозначение:

$$W = \{Lin_w, S_{polW}, Type_w, M_w, Hig_w, Len_w, S_w, d_w, k_w, Env_w\} \quad (4.1)$$

$$Lin = \{(x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_w\} : (x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_0 = (x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_n, \quad w = \overline{0, n} \quad (4.2)$$

где S_{polW} – площадь полигона ограждения;

Len_w – периметр полигона ограждения;

$Type_w$ – тип ограждения;

M_w – материал ограждения;

Hig_w – высота ограждения;

S_w – площадь ограждения;

d_w – толщина ограждения, м;

k_W – коэффициент теплопроводности стройматериала, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$;

Env_W – взаимодействие с окружающей средой. Ограждающими конструкциями в данном случае будут являться наружные стены, пол, крыша, окна, входная дверь.

Температура воздуха будет иметь обозначение T_V и состоять из температуры воздуха в помещении t_{in} , °С и температуры воздуха на улице t_{env} , °С:

$$T_V = \{t_{in}, t_{env}\} \quad (5)$$

Температуру теплоносителя в трубах можно обозначить через множество T_P :

$$T_P = \{t_{podP}, t_{obP}\} \quad (6)$$

где t_{podP} – температура воды в подающей магистрали, °С;

t_{obP} – температура воды в обратной магистрали, °С.

При оценке эффективности работы теплосистемы можно рассчитывать различные показатели, такие как теплоотдача помещения в целом (потребляемое тепло на отопление) и теплопотери помещения (теряемое тепло на отопление). С применением теоретико-множественного подхода в восприятии взаимодействий описанных выше объектов для описания этих величин систему можно обозначить как множество IPPR:

$$IPPR = \{F_{tr}, F_{mis}, F_{dif}\} \quad (7)$$

где F_{tr} – теплоотдача помещения;

F_{mis} – теплопотери помещения;

F_{dif} – разница между теплоотдачей и теплопотерями: $F_{dif} = F_{tr} - F_{mis}$.

Для описания величины теплоотдачи помещения используется следующее взаимодействие:

$$F_{tr} = \{Q_z, Q_{pip}, Q_{comp}, Q_h\} \quad (8)$$

где Q_z – теплоотдача от радиаторов, Вт;

Q_{pip} – теплоотдача от трубопроводов, Вт;

Q_{comp} – теплоотдача от компьютеров, Вт;

Q_h – тепло, выделяемое людьми в помещении, Вт.

$$Q_z \in \{H\} \quad (9)$$

$$Q_{pip} \in \{P\}, \{T_P\}, \{T_V\} \quad (10)$$

Для описания величины теплопотери помещения используется следующее взаимодействие:

$$F_{mis} = \{Q_{mis}, Q_{inf}\} \quad (11)$$

где Q_{mis} – теплопотери через граничащие с улицей ограждающие конструкции помещения;

Q_{inf} – теплопотери на инфильтрацию. Оба параметра вычисляются с использованием данных из множеств T_V и W .

Процесс взаимодействия представленных элементов в формализованном виде можно представить следующим образом:

$$F_{tr} \xrightarrow{\Sigma(Q_z, Q_{pip}, Q_{comp}, Q_h)} F_{mis} \xrightarrow{\Sigma(Q_{mis}, Q_{inf})} F_{dif} \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{LP, \beta_P, DP}^{t_{obP}, t_{in}} \\ H_{J_{rad}}^{NH} \end{array} \right\}_{Q_{comp}} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} W_{S_w, d_w, k_w}^{S_{polW}} \\ T_V \end{array} \right\} \xrightarrow{\Delta} F_{dif} \quad (13)$$

Такое формализованное описание на основе теоретико-множественного подхода позволяет перейти к следующему этапу – к созданию ИППР.

ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ОБЪЕКТОВ ИППР

Проектирование любой сложной ИС, основанной на ряде концепций и технологий – SADT, IDEF1X, UML и прочих методов проектирования; состоит из нескольких этапов. На первом

этапе выявляются функции взаимодействия и формируется функциональная модель проектируемой системы. На втором этапе выявляется информационная составляющая, необходимая для выполнения функций. Далее появляется возможность проектирования физической реализации системы – создания алгоритмов выявленных функций [4].

Согласно рис. Рис. 1, пользователю будет предоставлен проект оцифрованного плана здания в ГИС, состоящий из слоёв. Пользователь же при помощи созданной ИППР выбирает помещение в списке разработанного интерфейса, получает всплывающее информационное окно с вычисленными значениями тепловых затрат, теплопотерь и разницы между ними в числовом виде и в виде графика. ИППР будет использовать для расчета не только данные о помещении из цифрового двойника, но и значения переменных для формул, полученные при помощи инструмента вычисления площадей внешних ограждений помещения и его объема. Работа созданного инструмента заключается в вычислении площади граней помещения, которые непосредственно соприкасаются с окружающей средой, то есть внешних стен, окон и других возможных частей здания. Полученное значение площади является переменной в формуле расчёта количества тепла, затрачиваемого помещением в процессе теплопередачи между этим помещением и улицей через смежный слой, например, стену.

Таким образом конечными выходными данными могут являться такие параметры отопительной системы, которые позволяют провести мониторинг показателей системы отопления – разница между теплопотерями и потребляемым количеством тепла.

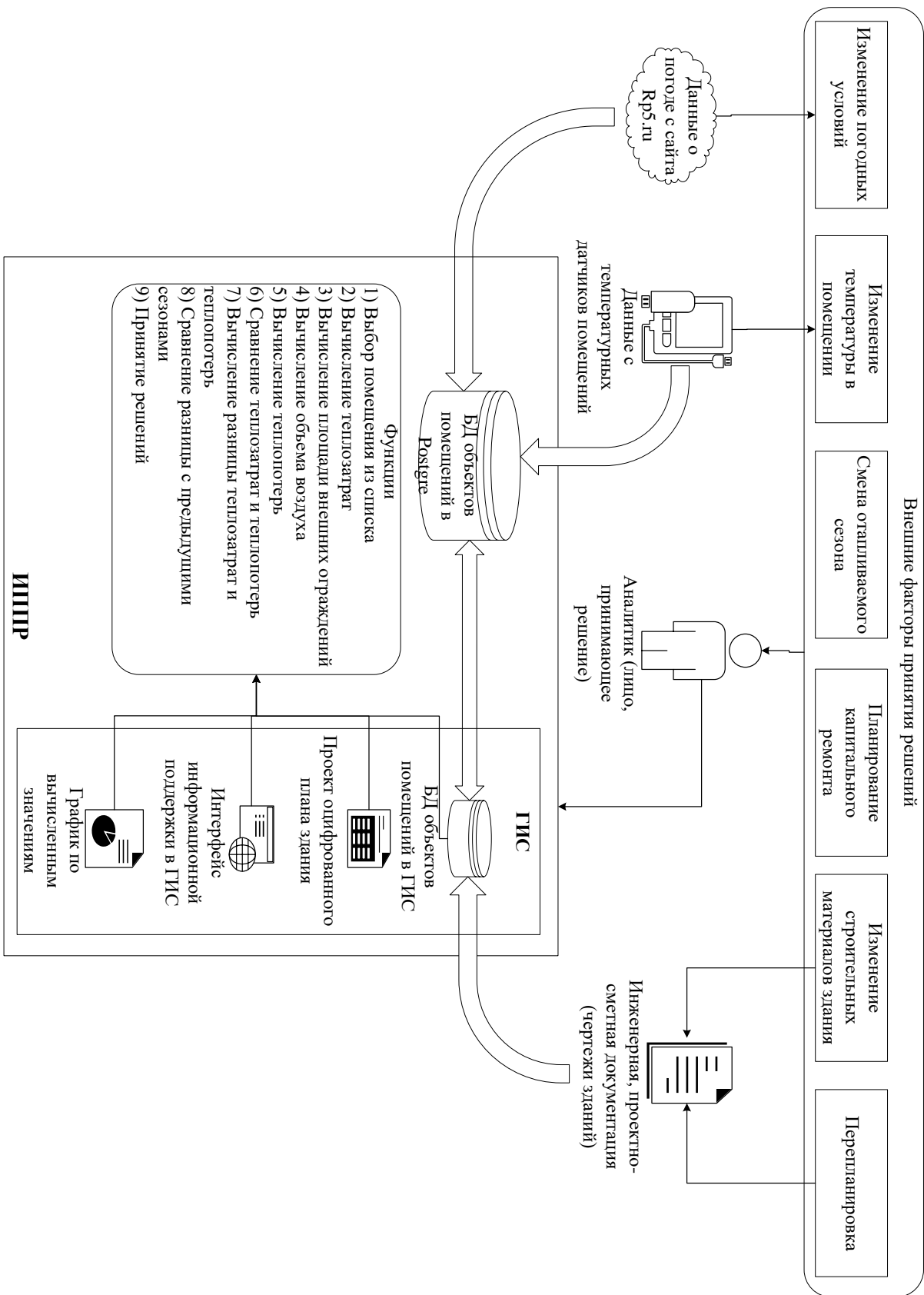


Рис. 1 – Применение цифровых двойников для ИППР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здания и сооружения могут являться старыми постройками со старыми системами отопления, поэтому требуют своего всестороннего анализа, как со стороны изменения коэффициентов теплопроводности стройматериалов, так и с точки зрения изменений секций радиаторов и т.д. Чтобы учесть все элементы проектируемой системы, применяется теоретико-множественное описание объектов и их взаимодействий. Результатом применения подхода являются формализованное описание всех объектов исследуемой предметной области и схема их взаимодействия, которые позволяют сформировать алгоритм работы СППР для решения большого круга задач, например, оценки эффективности теплоснабжения. С применением теоретико-множественного подхода были выявлены элементы взаимодействия в информационной поддержке принятия решений при управлении системой отопления помещения и описано их взаимодействие в виде формул (12) и (13), что позволило приступить к реализации СППР на базе ГИС-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова В. «Современные системы отопления» / В.И. Назарова // 2011 [Электронный документ]. URL: <https://azbukatepla.by/wp-content/uploads/2018/03/Uchebnik-Sovremennye-sistemy-otopleniya.pdf> (Дата обращения: 15.02.2024).
2. Атнабаев, А.Ф. Информационная поддержка принятия решений при аварийных разливах нефти по водным объектам на основе ГИС-технологий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Атнабаев А.Ф. – Уфа: УГАТУ, 2007. – 19 с.
3. «ГОСТ 22270–2018 Системы отопления, вентиляции и кондиционирования» // [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160840> (Дата обращения: 15.01.2024).
4. Заболева-Зотова А. В. Основы системного анализа: Учебное пособие/ С. А. Фоменков, Ю. А. Орлова. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012 – 230 с.
5. Красов А.В. Теория информационных процессов и систем. Лекция №8. Теоретико-множественное описание систем.

ОБ АВТОРАХ

ВИТВИНОВА Инна Игоревна, студ. каф. ГИС.

АТНАБАЕВ Андрей Фарагатович, доц. каф. ГИС. Канд. техн. наук. Иссл. в обл. применения ГИС технологий для решения прикладных задач.

METADATA

Title: Development of Digital Twins for the Formation of an Intelligent Ecosystem of the Campus.

Authors: I. I. Vitvinova¹, A. F. Atnabaev²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ Inna.Vitvinova@yandex.ru, ² aaf1981@mail.ru,

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (31), pp. 28-34, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This article analyzes the possibility of using digital twins to assess the efficiency of a heating system through information decision support.

Key words: information Technology; digital twin; drawings; thermal resources; design; heating system calculation; heat losses of the room; monitoring the efficiency of heat costs

About authors:

VITVINOVA, Inna Igorevna, master Student, Dept. of Geoinformation Systems.

ATNABAEV, Andrew Faragatovich, Associate Professor, Department of GIS, PhD in Technical Sciences. Researches the application of GIS technologies for solving applied problems.