

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ УЧАСТКОВ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОКЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР

Д. Н. Петров, Т. Б. Чистякова

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Разработка и использование интегрированных многокомпонентных систем автоматизированного проектирования и управления вносят изменения в процесс жизненного цикла продукции, что наиболее заметно в наукоемких сложных химико-технологических системах. В комплексном проектировании производственных объектов особое внимание уделяется безопасности, производительности, надежности, эргономике производственной линии и материально-технической среды. Наиболее эффективными в управлении проектами являются гибкие модели жизненного цикла, связывающие в единой информационной среде разнопрофильных специалистов. Обоснована актуальность задачи разработки и внедрения проблемно-ориентированных гетерогенных систем автоматизированного проектирования и цифрового прототипирования. Описан способ повышения эффективности проектирования производственных объектов при минимизации времени подготовки проектного решения, рисков возникновения ошибок проектирования, вызванных коммуникационным диссонансом разнопрофильных специалистов. Приведена архитектура системы автоматизированного проектирования и цифрового прототипирования с описанием ее базовых компонентов. Создание цифровой модели объекта проектирования описано на примере реакторного участка и материально-технической базы процесса синтеза углеродных нанокластерных структур, пользующихся высоким спросом в различных областях промышленности. Проведенные испытания и внедрение в образовательный процесс полученного прикладного программного решения подтвердили его эффективность в решении задач комплексного автоматизированного проектирования и цифрового моделирования не только объектов углеродной наноиндустрии, но и в других областях промышленности с аналогичной материально-технической базой.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, объект проектирования, цифровой прототип, база знаний, углеродные наноструктуры.

Для цитирования: *Петров Д. Н., Чистякова Т. Б.* Система автоматизированного проектирования и прототипирования участков синтеза углеродных нанокластерных структур // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 3. С. 16–27. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-16-27.

Введение

С перманентной трансформацией инженерных специальностей происходит слияние и совершенствование технологий автоматизированного проектирования. Развиваются и внедряются все новые высокопроизводительные интеллектуальные многокомпонентные системы проектирования и поддержки жизненного цикла промышленных объектов [1].

Впервые термин «система автоматизированного проектирования» (САПР, или CAD) использовал американский ученый Д. Т. Росс в конце 50-х гг. XX в. в рамках развития автоматизированных программных средств в производстве.

Изначально САПР применялись преимущественно для автоматизации конструкторско-технологической деятельности, например для проектирования деталей механизмов и промышленного оборудования. С начала текущего столетия в слиянии с CALS- и CASE-технологиями, а также технологиями виртуальной и дополненной реальности САПР активно применяются для проектирования сложных потенциально опасных производственных объектов [2]. При этом следует отметить относительно слабое развитие прикладных библиотек систем CAD, CAM, CAE для объектов химической и нефтехимической промышленности. Agile Manifesto, принятый в 2001 г. в штате

Юта (США), получил мировое признание как пример наиболее эффективной группы методик гибкого управления проектами [3]. Однако известная проблематика применения гибких инновационных подходов в проектной деятельности формирует субъективный коммуникационный барьер, обусловленный привлечением разнопрофильных специалистов и их взаимодействием [4]. Профессиональный диссонанс повышает риск появления ошибок проектирования – планировочных, инженерно-конструктивных, ошибок в расчете электро/водоснабжения, теплоотвода, освещения, аэрации и др. По статистике стоимость выявления и устранения ошибки проектирования, в сравнении с первоначальной стоимостью проекта, на стадии проектирования обходится дороже в 2 раза, на стадии приемочных испытаний – дороже в 10 раз, на стадии промышленной эксплуатации – дороже в 100 раз. Поэтому начальные этапы жизненного цикла объекта проектирования – предпроектные обследования, сбор и анализ исходных данных, формирование технического регламента – требуют особого подхода при использовании гибких технологий итерационного комплексного прототипирования объекта и составлении его формализованного описания.

Основными источниками ограничений и предписаний при проектировании промышленного объекта являются строительные нормы и правила, государственные межотраслевые, а также межгосударственные стандарты в области пожарной безопасности технологических процессов, безопасности и охраны труда, эргономики и технической эстетики. Общие положения нормативных документов препятствуют глубокой проработке вопросов безопасности персонала и минимизации убытков при возникновении специфических для отдельного проектируемого объекта нештатных ситуаций, а также требований эргономики автоматизированных рабочих мест и средств КИПиА. Поэтому нередко инженерами применяются нетрадиционные, слабо проработанные эвристические методы.

Целями предлагаемой авторами методики и прикладного программного средства для гибкого проектирования и цифрового моделирования промышленного объекта являются снижение риска возникновения ошибок на начальном этапе проектирования, минимизация затрат на проектирование, приемочные испытания и ввод объекта в эксплуатацию при объединении всех участников проектной деятельности различных профилей (руководства, аналитиков, инженеров, проектировщиков, административно-управленческого и обслуживающего персонала) в едином информационном пространстве интегрированной многокомпонентной САПР.

Материально-техническая база и производственный цикл углеродных наноструктур

В рамках проекта по развитию информационных технологий и поддержки жизненного цикла продукции углеродной наноиндустрии как развивающегося инновационного сегмента промышленности [5], а также в рамках прикладной НИР «Системы автоматизированного проектирования виртуальных моделей высокотехнологичных производственных систем» разработана многокомпонентная система автоматизированного проектирования и цифрового моделирования участков синтеза углеродных нанокластерных структур [6].

Целевыми компонентами производственного цикла углеродных наноструктур являются фуллерены, однослойные и многослойные нанотрубки, наноалмазы, производные модификации, смесь фуллеренола, гидратированные фуллерены и т. д. Развитие и расширение углеродной наноиндустрии объясняется особыми химическими, механическими, оптическими, термическими свойствами углеродных наноструктур, используемых в области приборостроения, машиностроения, фармацевтики, а также пищевой промышленности. Углеродные наноструктуры, в их сочетании с другими соединениями, позволяют синтезировать инновационные материалы, обладающие принципиально новыми свойствами.

Синтез углеродных наноструктур является многостадийным, малотоннажным, сложным и потенциально опасным из-за агрессивности рабочей среды (температура при плазменном электродуговом синтезе может достигать 10 000 К, давление инертного газа варьирует от 180 до 320 торр). В производстве фуллерена C_{60} или C_{70} используется электродуговая охлаждаемая установка Кречмера [7], при разгерметизации которой возрастает риск развития респираторных заболеваний у административно-управленческого персонала вследствие распространения в воздухе мелкодисперсной фуллереновой сажи. В качестве сырья используются дорогостоящие графитовые стержни-электроды повышенной степени очистки, риск утраты которых возрастает при выставлении неправильного режима работы установки или в результате неправильных и несвоевременных действий оператора при нештатной ситуации. В качестве инертного газа для ионизации

среды синтеза используется преимущественно гелий. На участке синтеза установлены циркуляционные и вакуумные насосы серии «АИР» с повышенным уровнем шума. Процессы являются автоматизированными и контролируются операторами. В производственную зону подведена вода, используемая в качестве хладагента, и переменное напряжение 380 В, понижаемое, преобразуемое и распределяемое по оборудованию. Использование точных измерительных устройств (например, измерителя-регулятора «ОВЕН 2ТРМ-1», жидкостного хроматографа «МИЛИХРОМ-4») накладывает дополнительные требования к среде их функционирования.

В России наиболее крупными центрами углеродной nanoиндустрии являются Научно-образовательный центр «Плазма» (г. Петрозаводск), НПК «НеоТекПродукт» (в. м. о. Петергоф), ООО «НаноТех-Центр» (г. Тамбов), ФГУП «СКТБ «Технолог»» (г. Санкт-Петербург).

Вариант производственного цикла фуллерена C_{60} , как одного из наиболее востребованных в фармацевтике и машиностроении, изображен на рис. 1.



Рис. 1. Вариант производственного цикла C_{60} ;
1 – электродуговая установка Кречмера; 2 – фуллереновый экстрактор;
3 – сепаратор C_{60} ; 4 – жидкостный хроматограф

На стадии 1 в установке Кречмера синтезируется мелкодисперсная фуллереновая сажа, содержащая до 44 % массы целевого продукта [7]. Полученная фуллереновая смесь экстрагируется в экстракторе 2 при использовании растворителей (бензол, о-ксилол, толуол) в соответствии с принятым целевым продуктом. На стадии 3 в сепараторе C_{60} целевой продукт отделяют от основной массы фуллереновой смеси. На стадии 4 исследуют состав и качество целевого продукта методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Как правило, на производстве стадии синтеза разделяют территориально. Первая стадия, как наиболее энергоемкая и потенциально опасная, проходит в отдельном производственном помещении – реакторном участке. Остальные стадии – менее опасные, но использующие лабораторные измерительные приборы повышенной точности, – проходят на участках экстрагирования, сепарации и в научно-исследовательской лаборатории.

Концептуальное описание процесса построения цифрового прототипа промышленного объекта

Процесс построения цифровой модели промышленного объекта в виде его 3D-модели со спецификацией ее компонентов представлен в концептуальной форме $Y = f(X, U)$, где $Y\{H_R, S_L\}$, $X\{G, H, E\}$, $U\{R_1, R_2\}$: X – исходные данные, включающие систему действующих рабочих стандартов G , формирующих общие ограничения; проектные данные об участке синтеза H , включая его масштабируемую 3D-модель; E – сведения об устанавливаемом оборудовании, включая его масштабируемые 3D-модели; U – система частных ограничений, включающая R_1 – технические (первичные) ограничения, накладываемые на характеристики устанавливаемого оборудования согласно эксплуатационным, техническим и экономическим требованиям; R_2 – пространственные (вторичные) ограничения, накладываемые на взаимное расположение оборудования в моделируемом помещении в соответствии с требованиями пожарной безопасности технологических процессов, безопасности и охраны труда, эргономики и технической эстетики; Y – полученный цифровой прототип объекта проектирования, включающий управляемую 3D-модель объекта проектирования H_R и спецификацию на нее S_L . $H\{N_H, A_H, Q_H, H_H, W_H, L_H, P\}$, где N_H – наименование поме-

щения; A_H – алиас (краткое системное наименование); Q_H – номер помещения; H_H – высота помещения, м; W_H – ширина помещения, м; L_H – длина помещения, м; P – система технических характеристик помещения, $P\{P_1^s, P_2^s, \dots, P_S^s, P_1^a, P_2^a, \dots, P_A^a\}$, где P_i^s – синглетные (одиночные) технические характеристики помещения, например вид тока (постоянный/переменный), напряжение электросети (220 или 380 В), объемный расход воды в магистрали; $i = 1, 2, \dots, S$. P_j^a – аддитивные (слагаемые) характеристики помещения, например производительность, мощность электросети, световой поток, расход воздуха вытяжной вентиляции и т. д.; $j = 1, 2, \dots, A$. $E\{E_1, E_2, \dots, E_K\}$, где E_k – размещаемый экземпляр оборудования в производственном помещении; $k = 1, 2, \dots, K$. $E_k\{T_k, M_k, A_k, H_k, W_k, L_k, P_1, P_2, \dots, P_N\}$, где T_k – тип оборудования (например, фуллереновой реактор, источник напряжения, контрольно-измерительное устройство); M_k – марка оборудования; A_k – алиас оборудования; H_k – высота оборудования, м; W_k – ширина оборудования, м; L_k – длина оборудования, м; P_e – технические, эксплуатационные и экономические характеристики оборудования; $e = 1, 2, \dots, N$.

Первичные ограничения R_1 накладываются на размещаемое в помещении H оборудование E с учетом правил сравнения их одноименных характеристик P_i^s, P_j^a и P_e . Для синглетных характеристик установлено только правило равенства « = ». Например, проектировщик не сможет добавить в помещение с напряжением электросети 220 В оборудование, работающее от напряжения 380 В. Для аддитивных характеристик установлены правила сравнения в виде равенства, строгих и нестрогих неравенств. Например, для достижения требуемой производительности реакторного участка, равной 3,5 кг/сут, в него следует включить три фуллереновых реактора суммарной производительностью 1,2 кг/сут. В этом случае принимается правило сравнения аддитивных характеристик « \geq ».

Пространственные ограничения R_2 представлены в виде квадратной матрицы

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & D_{\max}(E_2, E_1) & \dots & D_{\max}(E_e, E_1) & D_{\max}(H, E_1) \\ D_{\min}(E_1, E_2) & 0 & \dots & D_{\max}(E_e, E_2) & D_{\max}(H, E_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{\min}(E_1, E_e) & D_{\min}(E_2, E_e) & \dots & 0 & D_{\max}(H, E_e) \\ D_{\min}(E_1, H) & D_{\min}(E_2, H) & \dots & D_{\min}(E_e, H) & 0 \end{pmatrix},$$

где $D_{\min}(E_1, H), D_{\min}(E_2, H), \dots, D_{\min}(E_e, H)$ – минимальное расстояние от оборудования E_e до стены помещения H ; $D_{\max}(H, E_1), D_{\max}(H, E_2), \dots, D_{\max}(H, E_e)$ – максимальное расстояние от стены помещения H до оборудования E_e ; $D_{\min}(E_i, E_j)$ – минимальное расстояние между оборудованием E_i и оборудованием E_j ; $D_{\max}(E_j, E_i)$ – максимальное расстояние между оборудованием E_j и E_i , причем $i \in [1, e], j \in [1, e], i \neq j$.

Постановка комплексной задачи гибкого проектирования и построения цифрового прототипа производственного участка: для выбранного производственного помещения H и промышленного оборудования E в соответствии с требованиями системы действующих рабочих стандартов G и частными правилами, формирующими технические R_1 и пространственные R_2 ограничения на объект проектирования, разработать цифровой прототип производственного участка в виде управляемой 3D-модели H_R со спецификацией на нее S_L .

Архитектура и компоненты САПР

В основе архитектуры представленной САПР модульный принцип при разделении ее на несколько функциональных обеспечений: информационное обеспечение, включающее базу данных (БД) промышленного и вспомогательного оборудования и устройств, базу знаний (БЗ) нормативной документации, базу частных проектных правил (БП), математическое обеспечение, включающее алгоритмы верификации цифрового прототипа промышленного объекта с установленными ограничениями R_1 и R_2 , а также координатными коллизиями, программное обеспечение, включающее графические интерфейсы технического директора, инженера по знаниям, технического эксперта, проектировщика, административно-управленческого персонала.

Модульная архитектура полученного программного решения представлена на рис. 2.

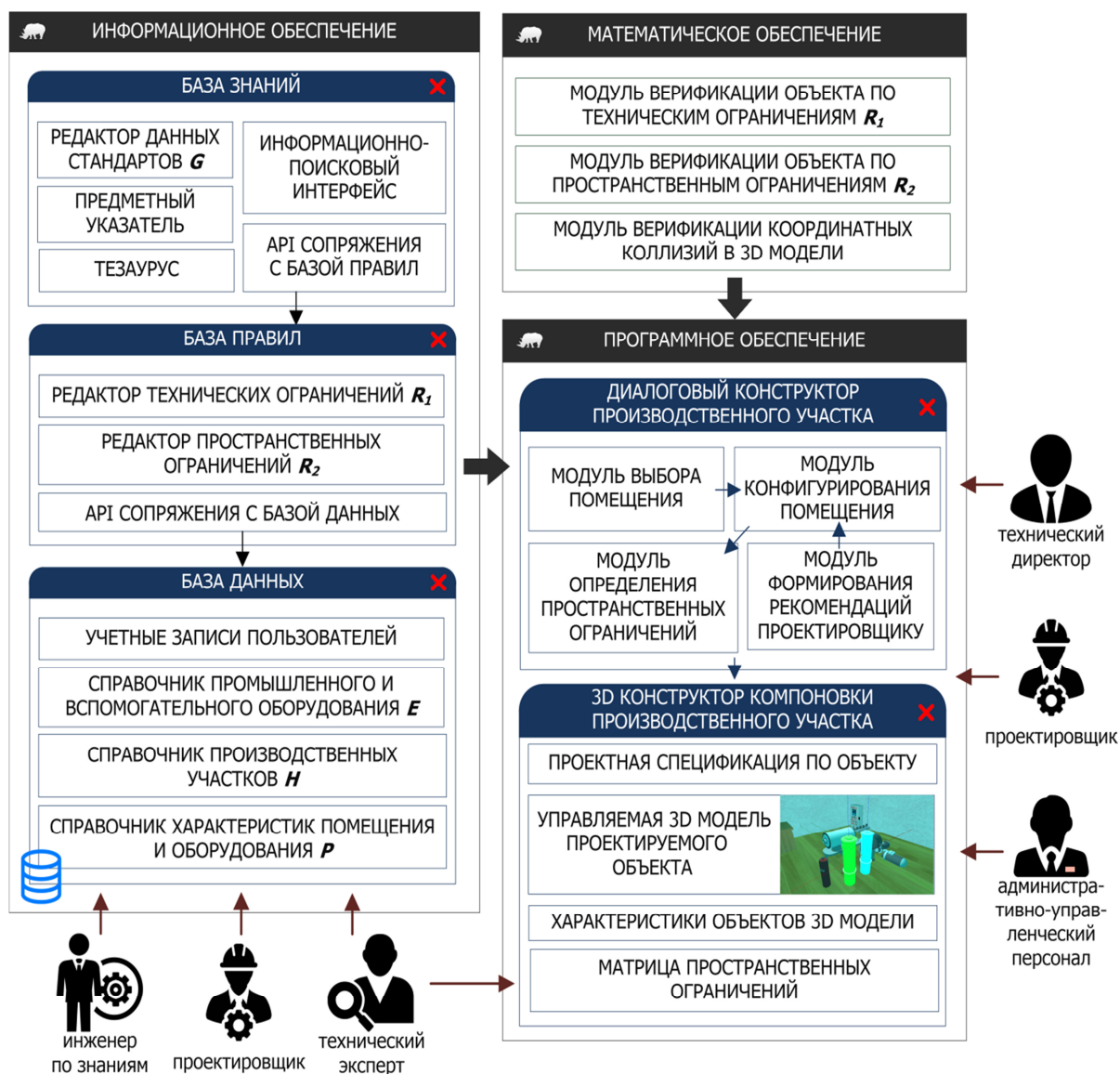


Рис. 2. Модульная архитектура системы автоматизированного проектирования и цифрового прототипирования промышленного объекта

Структура БЗ позволяет строить поисковый образ документа (ПОД) в полуавтоматическом режиме в виде текста с извлечением из него семантических конструкций (определений, условных обозначений, предписаний и т. д.), составляющих предметный указатель. Оригинал документа в формате PDF сопровождает ПОД и может быть извлечен из БЗ, открыт для просмотра и печати. Древоподобная структура знаний включает корневой уровень – вид документа (ГОСТ, СНИП, приказ, положение и т. д.). Второй уровень – номер и наименование документа (например, ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест»). Третий и ниже уровни могут быть структурированы по разделам, главам, пунктам соответствующего документа. При этом количество уровней иерархии не ограничено. Тезаурус БЗ выполнен в виде технического словаря с использованием хештегов с привязкой к фрагментам текста документа дескрипторами. Такой подход ускоряет поиск требуемого фрагмента документа по его ПОД, структурирует знания, стандартизирует переход от знаний к частным проектным правилам БП R_1 и R_2 .

База правил используется для формирования частных проектных правил в виде технических R_1 и пространственных R_2 ограничений. В БД сосредоточены справочники условно-постоянной информации о геометрических и технических характеристиках реакторных участков, промышленного и вспомогательного оборудования. Программное обеспечение является

сетевым, клиент-серверным, многопользовательским. Управление учетными записями и правами доступа пользователей осуществляет системный администратор через соответствующий интерфейс информационного обеспечения.

Ядро математического обеспечения составляют программные модули верификации проектируемого объекта по техническим ограничениям R_1 при его сборке в диалоговом конструкторе, верификации по пространственным ограничениям R_2 при компоновке помещения и размещения оборудования в пространстве его 3D-модели в визуальном конструкторе. Для отслеживания и исключения пространственных коллизий между 3D-моделями используется модуль верификации координатных коллизий.

В диалоговом конструкторе проектировщик, владея техническими данными о помещении и устанавливаемом в нем оборудовании, знаниями, полученными через информационно-поисковый интерфейс БЗ, производит выбор и включение в помещение оборудования с параллельной верификацией проектного решения по первичным ограничениям. Модуль формирования рекомендаций проектировщику используется для вывода комплексного сообщения с указанием причин несоответствия техническим ограничениям R_1 . После выбора промышленного и вспомогательного оборудования, удовлетворяющего R_1 , проектировщиком формируется матрица пространственных ограничений R_2 с последующим переходом в режим 3D-конструирования.

При работе в 3D-конструкторе компоновки производственного участка проектировщику доступна спецификация по объекту, включающая геометрические и технические характеристики и количество включенного в проектируемый участок оборудования. Визуализация матрицы R_2 позволяет осуществить оперативное определение и устранение несоответствий пространственным ограничениям. В итоге цифровая модель проектируемого объекта доступна в виде текстовой спецификации, файлов растрового формата BMP и универсального формата 3D-графики – DWG.

Проектирование и цифровое прототипирование

Построение цифрового прототипа производственного участка со спецификацией его компонентов начинается с этапа определения и ввода в БЗ действующих нормативных документов G с заполнением предметного указателя по ним и созданием дескрипторов в тезаурусе. Параллельно ведется разработка масштабированных 3D-моделей помещения и оборудования в выбранной универсальной среде трехмерного моделирования (например, Autodesk «3D Studio Max», DS «SolidWorks», АСКОН «Компас 3D» и т. д.). В БД формируются данные о геометрических и технических характеристиках моделируемого помещения и оборудования. Сопряжение БД и БЗ происходит через соответствующие прикладные программные интерфейсы (API), определенные ранее дескрипторы и редактор технических ограничений. При сопряжении БД и БЗ в формульном редакторе формируются зависимости вида $P = f(H_H, W_H, L_H, DSC_1, DSC_2, \dots, DSC_N)$, где DSC – массив дескрипторов, включающий элементы $DSC_i\{DN, DS, DF, DV\}$; где DN – наименование дескриптора; DS – начальная позиция в ПОД; DF – конечная позиция в ПОД; DV – численное значение; N – общее количество дескрипторов в БЗ, $i \in [1, N]$.

Приведем пример проектирования и прототипирования производственного объекта с использованием предлагаемого программного обеспечения и данных о реакторном участке химического синтеза фуллереновой сажи (1 стадия).

Начальный этап проектирования проходит в интерфейсах БЗ, позволяющих аккумулировать знания в форме, принятой для использования в БП. Ниже приведен пример сопряжения одной из характеристик оборудования с требованием стандарта.

В зоне химического синтеза фуллереновой сажи используются пыле/влагозащитные потолочные светильники. ГОСТ Р 55710-2013 регламентирует нормы освещенности и равномерность освещения для химической промышленности, в производстве пластмассовых и резиновых изделий (рис. 3).

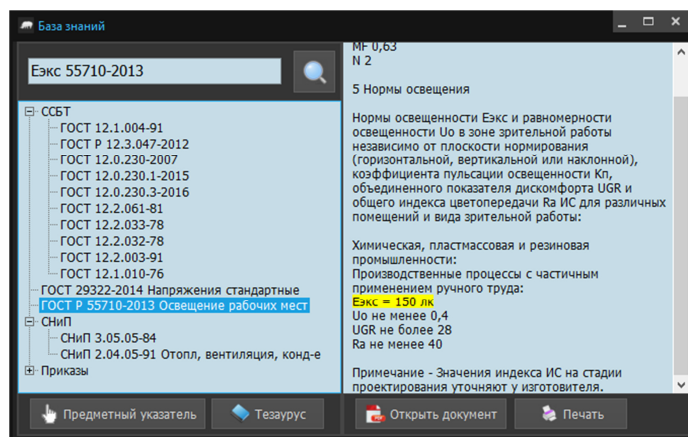


Рис. 3. Фрагмент информационно-поискового интерфейса базы знаний

Дескриптор Еккс, соответствующий маркированному в результате поиска тексту из ПОД, накладывает ограничение на освещенность в промышленной зоне, которая должна быть равна 150 лк. В качестве осветительных приборов выбран светильник Varton B1-A0, световой поток которого 3 000 лм (рис. 4).

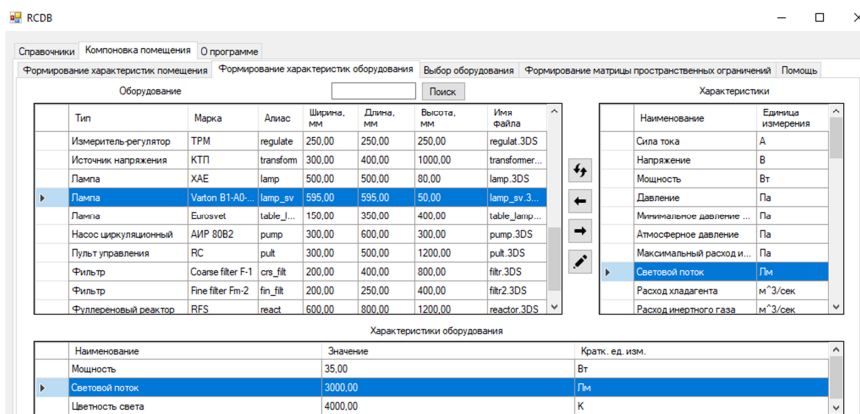


Рис. 4. Фрагмент интерфейса диалогового конструктора: вкладка «Формирование характеристик оборудования»

Площадь выбранного помещения $S_H = W_H \cdot L_H = 5 \cdot 7 = 35$ м (рис. 5).

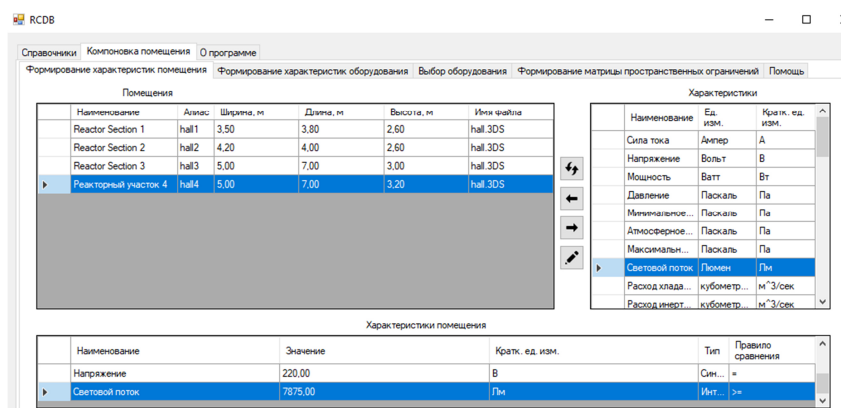


Рис. 5. Фрагмент интерфейса диалогового конструктора: вкладка «Формирование характеристик помещения»

По технической формуле для нормы освещенности $H_{\text{лм}}$, учитывающей коэффициент на высоту потолка ($K_{\text{вп}} = 1,5$ для $H_{\text{н}}$ от 3 до 3,5 м ($H_{\text{н}} = 3,2$ м)), получаем: $H_{\text{лм}} = E_{\text{экс}} \cdot S_{\text{н}} \cdot K_{\text{вп}}$. $H_{\text{лм}} = 150 \cdot 35 \cdot 1,5 = 7\,875$ лк. $H_{\text{лм}}$ – аддитивная характеристика выбранного помещения (рис. 5) с правилом сравнения « \geq ». Количество светильников со световым потоком, равным 3 000 лм, определяется как $H_{\text{лм}}/3\,000 = 7875/3000 = 2,625 \approx 3$ шт.

При добавлении в проектируемый реакторный участок оборудования с характеристикой «световой поток» при верификации по техническим ограничениям R_1 с учетом вида характеристики «аддитивная» и правилом ее сравнения « \geq » проверяется истинность выражения

$$\sum_{i=1}^K E_i\{LF\} \geq H_{\text{лм}}, \text{ где } E_i\{LF\} - \text{ величина светового потока } i\text{-го светильника; } K - \text{ количество светильников.}$$

При выполнении вышеуказанного неравенства компоновка помещения происходит в штатном режиме, R_1 удовлетворены. При невыполнении неравенства проектировщик получает сообщение о недостаточном или избыточном световом потоке для помещения с заданной площадью. Указанное правило суммируется с остальными действующими правилами по синглетным и аддитивным характеристикам. Например, при превышении максимальной мощности электросети при попытке добавления в помещение нового устройства-потребителя добавление этого устройства отклоняется. Проектировщик вынужден исключить из модели помещения какое-либо устройство-потребитель или заменить его аналогом с меньшей мощностью.

При работе в диалоговом конструкторе помещения проектировщик получает спецификацию на объект проектирования с оборудованием, еще не размещенным в его пространстве, согласно вторичным ограничениям R_2 . При этом координаты X, Y, Z всех моделей, добавленных в проектируемый участок, равны 0 (геометрический центр модели помещения).

Размещение ранее добавленного в помещение оборудования осуществляется через 3D-конструктор компоновки, в котором проектировщик, используя средства визуального моделирования и позиционирования, в режиме свободного обзора размещает 3D-модели оборудования в пространстве 3D-модели помещения (рис. 6).

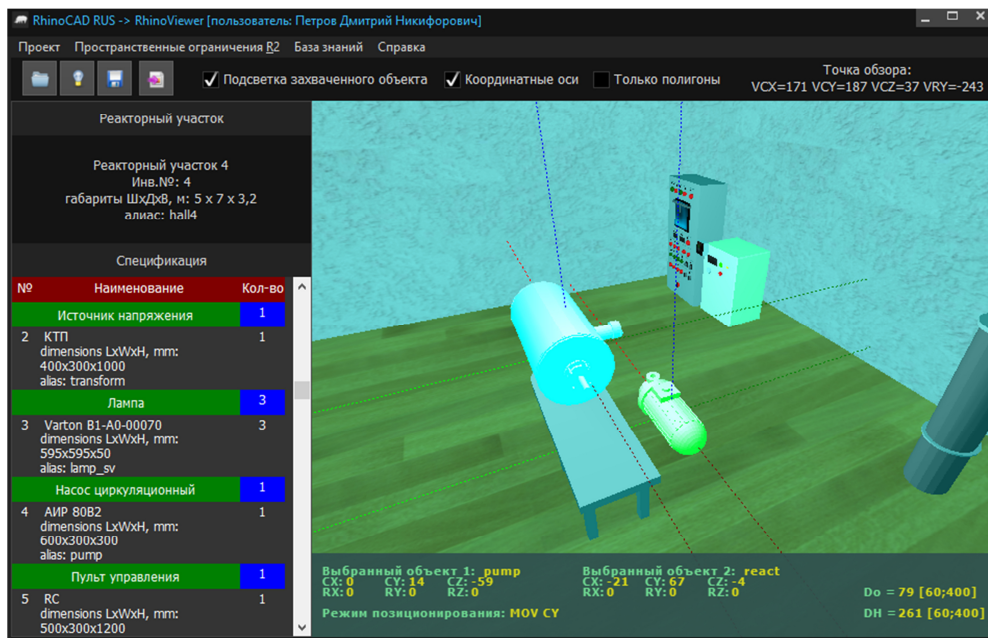


Рис. 6. Интерфейс 3D-конструктора компоновки производственного участка

Среди прочих инструментов проектировщика – выбор двух объектов, измерение расстояния Do , 10^{-2} м между ними, расстояния между первым выбранным объектом и ближайшей стеной помещения DH , 10^{-2} м, шесть режимов позиционирования: MOV CX, MOV CY, MOV CZ (линейное перемещение объекта параллельно соответствующей оси), ROT OX, ROT OY, ROT OZ (вращение выбранного объекта вокруг соответствующей оси).

На рис. 6 приведен пример моделируемого реакторного участка с фуллереновым электродуговым реактором Кречмера, вблизи которого расположен циркуляционный насос АИР 8 082. Около главного пульта управления РС расположен источник напряжения КТП.

Согласно матрице пространственных ограничений R_2 (рис. 7) расстояние между насосом (pump) и реакторной зоной (place), а также между пультом управления (pult) и источником напряжения (transform) менее допустимого (красный фон ячеек) и требует корректировки.

a

б

Рис. 7. Матрица пространственных ограничений до корректировки положения оборудования (*a*) и после корректировки (*б*)

После корректировки положения transform и pump проектировщик получает цифровой прототип реакторного участка, полностью соответствующий техническим R_1 и пространственным R_2 ограничениям (рис. 8).

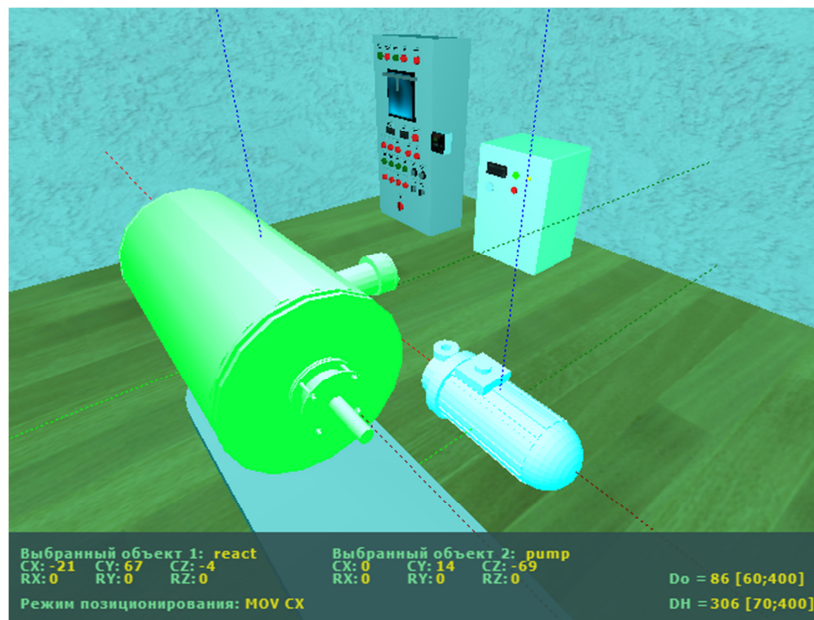


Рис. 8. Фрагмент 3D-модели реакторного участка после корректировки положения transform и pump

Апробация и ввод в опытную эксплуатацию полученного программного продукта выполнялись в Санкт-Петербургском государственном техническом институте (техническом университете) на кафедре систем автоматизированного проектирования и управления с использованием производственных данных промышленного предприятия ЗАО «Инновации ленинградских

институтов и предприятий» (г. Санкт-Петербург). В ходе испытаний и опытной эксплуатации системы автоматизированного проектирования и прототипирования была подтверждена ее пригодность не только для объектов углеродной наноиндустрии, но и для промышленности со сходной материально-технической базой.

Заключение

Предложенная система автоматизированного проектирования и прототипирования участков синтеза углеродных нанокластерных структур оказывает информационную поддержку процесса проектирования химико-технологического объекта в соответствии с современными моделями жизненного цикла управления проектами и рабочей нормативной документацией. Данный подход применим при разработке цифрового прототипа для дальнейшего комплексного обследования на нем проектируемого промышленного объекта, уже на ранних этапах жизненного цикла удовлетворяющего требованиям безопасности и работоспособности оборудования, безопасности и эргономики управленческо-производственного персонала.

Программный продукт может быть рекомендован вузам с химическими и техническими направлениями обучения, а также региональным предприятиям углеродной наноиндустрии НПК «НеоТекПродакт» (в. м. о. Петергоф), НПК «Современные технологии синтеза» (г. Санкт-Петербург), НПП «Композитные материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистякова Т. Б., Фураев Д. Н., Защиринский С. В. Программный комплекс для проектирования виртуальных моделей инновационных промышленных объектов // Автоматизация в промышленности. 2018. № 11. С. 28–32.
2. Артамонов Е. И., Ромакин В. А. Использование средств виртуальной реальности при проектировании и эксплуатации промышленных производств // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 14–16.
3. Кирьянов Б. А. Применение гибкой методологии Agile в управлении проектами // Техника и технологии: теория и практика: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 25 марта 2020 г.). Пенза: Наука и просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2020. С. 38–42.
4. Мышкин С. В. Взаимовлияние профессиональных подязыков в совместной деятельности разнопрофильных специалистов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер.: Лингвистика и межкультурная коммуникация. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. Т. 12. № 2. С. 32–39.
5. Кожитов Л. В., Киселев Б. Г., Райкова Т. В., Попкова А. В., Костишин В. Г., Муратов Д. Г., Якушко Е. В., Косушкин В. Г., Бебенин В. Г. Оценка объектов интеллектуальной собственности в сфере наноиндустрии // Изв. высш. учеб. заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20. № 4. С. 291–306. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-4-291-306.
6. *С-во о рег.* программы для ЭВМ № 2021613256 РФ. Система автоматизированного проектирования виртуальных моделей реакторных участков синтеза углеродных нанокластерных структур («Rhino-CAD RUS») / Петров Д. Н., Курзенёва О. В., № 2021612411; заявл. 25.02.2021; опубл. 04.03.2021.
7. Грузинская Е. А., Кескинов В. А., Кескинова М. В., Семенов К. Н., Чарыков Н. А. Фуллереновая сажа электродугового синтеза // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т. 3. № 6. С. 83–90.

Статья поступила в редакцию 03.06.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Никифорович Петров – канд. техн. наук; доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); Россия, 190013, Санкт-Петербург; petrov.dmitry@technolog.edu.ru.

Тамара Балабековна Чистякова – д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); Россия, 190013, Санкт-Петербург; nov@technolog.edu.ru.



SYSTEM OF AUTOMATED DESIGN AND PROTOTYPING OF SYNTHESIS SITES OF CARBON NANOCUSTER STRUCTURES

D. N. Petrov, T. B. Chistyakova

*Saint-Petersburg State Institute of Technology,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The article focuses on using the integrated multi-component computer-aided design and control systems, which changes the product life cycle processes in the high-tech complex chemical and technological systems. In the integrated design of production facilities, special attention is paid to safety, productivity, reliability, ergonomics of the production line and the material and technical environment. The most effective in project management are flexible life cycle models that connect diverse specialists in a single information environment. The relevance of the task of developing and implementing problem-oriented heterogeneous computer-aided design and digital prototyping systems is justified. There is described a method for improving the efficiency of designing production facilities while minimizing the time required preparing a design solution, and the risks of design errors caused by the communication dissonance of diverse specialists. The architecture of the computer-aided design and digital prototyping system with a description of its basic components is presented. The creation of a digital model of the design object is described on the example of the reactor site and the material and technical base of the process of synthesis of carbon nanocluster structures that are in high demand in various industries. The conducted tests and the introduction of the resulting applied software solution into the educational process proved its efficiency in solving problems of integrated computer-aided design and digital modeling not only of objects of the carbon nanoindustry, but also for other industries with a similar material and technical base.

Key words: computer-aided design, object of design, digital prototype, knowledge base, carbon nanostructures.

For citation: Petrov D. N., Chistyakova T. B. System of automated design and prototyping of synthesis sites of carbon nanocluster structures. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;3:16-27. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-16-27.

REFERENCES

1. Chistyakova T. B., Furaev D. N., Zashchirinskii S. V. Programmnyi kompleks dlia proektirovaniia virtual'nykh modelei innovatsionnykh promyshlennykh ob"ektov [Software package for designing virtual models of innovative industrial facilities]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2018, no. 11, pp. 28-32.
2. Artamonov E. I., Romakin V. A. Ispol'zovanie sredstv virtual'noi real'nosti pri proektirovanii i ekspluatatsii promyshlennykh proizvodstv [Using virtual reality tools in design and operation of industrial production]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 4, pp. 14-16.
3. Kir'ianov B. A. Primenenie gibkoi metodologii Agile v upravlenii proektami [Application of agile methodology in project management]. *Tekhnika i tekhnologii: teoriia i praktika: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Penza, 25 marta 2020 g.)*. Penza, Nauka i prosveshchenie (IP Guliaev G.Iu.), 2020. Pp. 38-42.
4. Myskin S. V. Vzaimovliianie professional'nykh pod"iazykov v sovместnoi deiatel'nosti raznoprofil'nykh spetsialistov [Mutual influence of professional sublanguages in joint activity of multidisciplinary specialists]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i mezhkul'turnaia kommunikatsiia*. Novosibirsk, Izd-vo NGU, 2014. Vol. 12, no. 2, pp. 32-39.
5. Kozhitov L. V., Kiselev B. G., Raikova T. V., Popkova A. V., Kostishin V. G., Muratov D. G., Iakushko E. V., Kosushkin V. G., Bebenin V. G. Otsenka ob"ektov intellektual'noi sobstvennosti v sfere nanoindustrii [Assessment of intellectual property objects in nanoindustry]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 291-306. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-4-291-306.

6. Petrov D. N., Kurzeneva O. V. *Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniia virtual'nykh modelei reaktornykh uchastkov sinteza uglerodnykh nanoklasternykh struktur («RhinoCAD RUS»)* [Computer-aided design system for virtual models of reactor sections for synthesis of carbon nanocluster structures (“RhinoCAD RUS”)]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM № 2021613256 RF; 04.03.2021.

7. Gruzinskaia E. A., Keskinov V. A., Keskinova M. V., Semenov K. N., Charykov N. A. Fullerenovaia sa-zha elektrodugovogo sinteza [Fullerene soot of electric arc synthesis]. *Nanosistemy: fizika, khimiia, matematika*, 2012, vol. 3, no. 6, pp. 83-90.

The article submitted to the editors 03.06.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy N. Petrov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Computer-Aided Design and Control Systems; Saint-Petersburg State Institute of Technology; Russia, 190013, Saint-Petersburg; petrov.dmitry@technolog.edu.ru.

Tamara B. Chistyakova – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Computer-Aided Design and Control Systems; Saint-Petersburg State Institute of Technology; Russia, 190013, Saint-Petersburg; nov@technolog.edu.ru.

