**Международная Объединенная Академия Наук
Межрегиональный Гуманитарно-Технический Университет**

Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук

Сборник научных трудов

**по материалам
XIX международной научной конференции**

12 октября 2018 г.

Санкт-Петербург 2018

УДК 501
ББК 30

Н34

Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук.
Сборник научных трудов, по материалам XIX международной научно-практической конференции 12 октября 2018 г. Изд. ЦНК МОАН, 2018. – 64с.

SPLN 001-000001-0344-TT
DOI 10.18411/spc-12-10-2018
IDSP 000001: spc-12-10-2018

В сборнике научных трудов собраны материалы из различных областей научных знаний. В данном издании приведены все материалы, которые были присланы на XIX международную научно-практическую конференцию
Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук

Сборник предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

Все материалы, размещенные в сборнике, опубликованы в авторском варианте. Редакция не вносила коррективы в научные статьи. Ответственность за информацию, размещенную в материалах на всеобщее обозрение, несут их авторы.

Информация об опубликованных статьях будет передана в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и наукометрическую базу SPINDEX

Электронная версия сборника доступна на сайте ЦНК МОАН. Сайт центра: conf.sciencepublic.ru

УДК 501
ББК 30

SPLN 001-000001-0344-TT

<http://conf.sciencepublic.ru>

Содержание

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ	5
Варламов Д.Б., Савчиц А.В. Разработка и исследование адаптивного регулятора.....	5
Годовицын И.В., Суханов В.С., Гусев Д.В. Испытательно-измерительный комплекс для высокотемпературных преобразователей давления.....	7
Горленко Н.П., Саркисов Ю.С., Павлова А.Н., Сырямкин В.И., Клецов С.А. Представления о волновом механизме процессов структурообразования цементных композиций.....	10
Ефремкин С.И., Грицун Б.М., Савчиц А.В. Разработка автоматизированной системы управления биореактором для выращивания микроводорослей.....	14
Женжурист И.А. Микроволновое спекание алюмосиликатных композиций – перспективная технология керамики.....	17
Косарева-Володько О.В., Чепкасов А.И. Повышение надежности электропередачи с помощью коммутационного аппарата – Реклоузер.....	19
Матрохин А.Е., Силаев А.А. Исследование систем управления умным домом	23
Островский А.А., Савчиц А.В., Костин В.Е. Разработка адаптивного датчика влажности почвы.....	26
Скуднева О.В. Безальтернативность беспилотных летательных аппаратов в реалиях сегодняшней геополитики.....	27
Шалумов А.С., Ильин С.А. Автоматизированная подсистема анализа надёжности несущих конструкций элементов, устройств, приборов энергетики при механических воздействиях «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ-НАДЕЖНОСТЬ-НК»	35
Шуленин С.С., Рязанцев А.Е. Пути снижения горючести полимерных материалов.....	38
РАЗДЕЛ II. ФИЗИКА	40
Шляхтенко П.Г. Ошибки, допускаемые при расчетах электромагнитных полей в ос-новных учебниках курса общей физики.....	40

РАЗДЕЛ III. МАТЕМАТИКА.....	49
Кадиев Р.И., Поносов А.В. Стохастическая устойчивость и допустимые пары пространств.....	49
Литвиненкова З.Н., Осюк Е.А. К вопросу о прочностном ресурсе воздушного судна	52
Мамедова Ф.М. Магний-натрий катионирование минерализованных вод широкого класса.....	58

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Варламов Д.Б., Савчиц А.В.

Разработка и исследование адаптивного регулятора

*Волжский политехнический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»
(Россия, Волжский)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-01

idsp: 000001:spc-12-10-2018-01

В настоящее время, большинство регуляторов, представленных на рынке, не имеют функции адаптации. Таким образом, при изменении условий в процессе регулирования, эффективность работы системы может ухудшаться, что влечет за собой потери энергетических и материальных ресурсов.

В промышленности наиболее широко распространенным методом регулирования является позиционный метод [1]. Позиционные регуляторы являются простыми и удобными в использовании. Основная особенность таких регуляторов заключается в том, что их регулирующий орган может занимать ограниченное число определенных положений [2]. Для двухпозиционного регулятора их может быть два (например, включение или отключение ТЭНа). Применение таких приборов позволяет делать системы достаточно надежными, т.к. отсутствует риск получения расходящегося процесса в случае каких-либо внешних возмущений.

Однако, обычные позиционные регуляторы могут быть не достаточно эффективными с точки зрения поддержания искомой величины в заданных пределах. В системах с изменяющимися со временем условиями, а также в системах с внешними возмущениями, качество процесса может ухудшаться. Изначально правильно настроенная система, в будущем, может не соблюдать заданные параметры. Особенно это важно для регулирования объектов, обладающих большой инерционностью, т.к. величина перерегулирования может достигать больших значений.

Для решения этой проблемы предлагается использование адаптивного двухпозиционного регулятора. Структурная схема работы данного прибора представлена на рисунке 1.

Рисунок 1– Структурная схема работы регулятора: X – Текущее значение поддерживаемого параметра, Y – сигнал к исполнительному механизму, SP – уставка, SP^* – скорректированная уставка для двухпозиционного регулятора, блок №1 – блок подсчета верхнего и нижнего перерегулирования на N -ом шаге, блок №2 – блок определения времени включения/отключения исполнительного механизма на N -ом шаге, с учетом перерегулирования на шаге $N-1$, блок №3 – блок двухпозиционного регулятора.

Действие адаптивного регулятора основано на корректировке времени включения/отключения исполнительного механизма. Зная перерегулирование на предыдущем шаге, можно вычислить, на сколько раньше необходимо включить/отключить регулирующий орган, чтобы избавиться от этого перерегулирования или сделать его симметричным относительно уставки SP.

Для визуализации, с использованием структурной схемы регулятора на рисунке 1, было произведено моделирование системы поддержания температуры. Здесь величина перерегулирования будет больше, чем диапазон, в пределах которого может изменяться регулируемый параметр и полностью избавиться от этого перерегулирования невозможно. В таких случаях основной задачей будет установить колебания регулируемого параметра симметрично относительно уставки SP, что позволит уменьшить экстремальные значения перерегулирования. На рисунке 2 представлен график поддержания величины с уставкой, равной 15°C и гистерезисом, равным 1°C. Из него видно, что на первом шаге присутствует большое превышение верхней границы. Значение параметра достигает 21°C, в то время как выход за нижнюю границу практически отсутствует. Система, определив экстремальные значения на верхней и нижней границе, корректирует время включения/отключения ТЭНа и колебания температуры становятся симметричными относительно уставки.

Рисунок 2 – График поддержания температуры с адаптивным регулированием.

Из рисунка 2 видно, что на 2-м, 3-м и 4-м шагах происходит постепенная подстройка и колебания еще не полностью установились, но, начиная с 5-го шага, система выходит на стабильные симметричные колебания с перерегулированием 2,5°C на обеих границах, что составляет 16%. В начале работы перерегулирование на верхней границе достигало 5°C, что составляет 33%. Такая корректировка производится постоянно в ходе регулирования, что позволяет независимо от внешних возмущений сохранять требуемое качество.

Таким образом, данный прибор позволит повысить точность поддержания заданной величины, что приведет к экономии сырья и ресурсов, к повышению качества готового продукта.

1. Николаенко, С.А. Автоматизация систем управления: учеб. пособие / С. А. Николаенко, Д. С. Цокур. – Краснодар: Изд-во ООО «Крон», 2015. - 119 с.
2. Рукин, В.Л. Системы управления химико- технологическими процессами: учебное пособие / В.Л. Рукин, У.Ю. Коробейникова. – СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2010. – 136 с.

Годовицын И.В., Суханов В.С., Гусев Д.В.
Испытательно-измерительный комплекс для высокотемпературных преобразователей давления

НПК "Технологический центр"
(Россия, Зеленоград)

doi:10.18411/spc-12-10-2018-02

ids: 000001:spc-12-10-2018-02

В настоящее время в нефтегазовой отрасли, нефтехимической промышленности (изготовление пластмассовых изделий), автомобильном, авиационном и космическом транспорте существует потребность в измерении давления при высокой температуре [1-3]. Данная задача чаще всего решается с помощью высокотемпературных кремниевых преобразователей давления. Кроме решения ряда конструкционных и технологических задач, среди которых такие как создание высокотемпературного чувствительного элемента (ЧЭ), создание высокотемпературного корпуса, создание электрического соединения преобразователя давления и выводов корпуса, стойкого к высокой температуре и другие, разработка высокотемпературного кремниевого преобразователя давления требует метрологического обеспечения, которое может быть реализовано с помощью испытательно-измерительного комплекса. Данный комплекс должен удовлетворять целому ряду требований, среди которых не только обеспечение требуемых режимов измерений, но и передача и обработка результатов измерений в режим онлайн. В связи с тем, что стандартное измерительное оборудование рассчитано на проведение измерений кремниевых преобразователей с традиционным температурным диапазоном, чаще всего от -45°C до $+125^{\circ}\text{C}$, разработка испытательно-измерительного комплекса для высокотемпературных кремниевых преобразователей давления представляет технически сложную и актуальную задачу.

В данной работе проведена разработка испытательно-измерительного комплекса для высокотемпературных кремниевых преобразователей давления, имеющих температурный диапазон от -45°C до $+220^{\circ}\text{C}$. При разработке комплекса использован многолетний опыт НПК "Технологический центр" в области создания кремниевых преобразователей давления, изготовленных с использованием технологии объемной микрообработки. В качестве отправной точки использована структура измерительного оборудования, применяемая при производстве серийных преобразователей ИПД8.

Особенность конструкции ЧЭ высокотемпературного преобразователя давления заключается в использовании КНИ-структуры для кристалла с мембраной – рисунок 1. В кристалле тензорезисторы из монокристаллического кремния изолированы от подложки толстым слоем термического оксида кремния, что, в отличие от традиционной конструкции с диффузионными тензорезисторами, обеспечивает отсутствие токов утечки при температурах выше 150°C . Более того, по имеющимся данным, такая изоляция тензорезисторов позволяет достичь верхнего предела рабочей температуры преобразователя в $600-700^{\circ}\text{C}$ [4,5]. Эта температура соответствует температурному пределу упругости монокристаллического кремния и, кроме того, температуре, при которой собственная проводимость монокристаллического кремния начинает сравниться с примесной проводимостью [6]. Дальнейшее повышение рабочей температуры преобразователя нецелесообразно, потому что не столько из-за возникающих паразитных явлений, а из-за катастрофических изменений свойств материалов преобразователя, достижение приемлемых метрологических характеристик становится невозможным. Можно сказать, что КНИ-структура позволяет полностью использовать потенциал кремниевого преобразователя давления как устройства для измерения значения физической величины, вследствие чего выступает наиболее

привлекательным исходным материалом при разработке высокотемпературного преобразователя давления.

1 – кремниевая подложка;
2 – жесткие центры в основании;
3 – изолирующий слой термического окисла;
4 – кремниевые тензорезисторы.
Рисунок 1 – Эскиз кристалла на КНИ-структуре

Как указывалось выше, разработка испытательно-измерительного комплекса для высокотемпературных кремниевых преобразователей давления связана с необходимостью использовать расширенный перечень оборудования. В частности, необходимо использовать 2 климатические камеры для задания температуры. Первая камера обеспечивает диапазон температур от предельного нижнего значения (минус 45 °С) до нормальной (20 °С), вторая от нормальной до предельного верхнего значения (220 °С). Совмещение обоих температурных диапазонов в одной камере затруднительно с точки зрения конструкции и затрат на изготовление. Представленные на рынке климатические камеры охватывают максимальный температурный диапазон от минус 86 °С до 180 °С. Таким образом, использование 2х климатических камер является необходимым условием для реализации метрологического обеспечения высокотемпературного преобразователя давления. Либо может быть выбрана конфигурация из одной климатической камеры и одного нагревательного шкафа, который будет использоваться для только измерений при повышенной температуре.

В данной работе в качестве климатической камеры выбрана камера ESPEC MC-812 (рисунок 2а). Камера предназначена для проведения климатических испытаний на воздействие тепла и холода в диапазоне температур от минус 85 °С до +180 °С. Камера имеет высокую производительность, широкий диапазон температур и позволяет проводить климатические испытания образцов в рабочем объеме 64 литра. Основные особенности камеры: постоянный и программируемый режим испытаний, возможность объединения нескольких камер в сеть, возможность записи и сохранения на внешнем носителе данных выборки (заданное и текущее значение температуры), прикладное программное обеспечение для ПК Pattern Manager Lite, позволяющее изменять и редактировать программы испытаний, отображать, печатать и конвертировать сохраненные данные; смотровое окно, изготовленное из многослойного подогреваемого стеклопакета для обеспечения хорошей видимости без наледей.

Рисунок 2 – а) Внешний вид климатической камеры ESPEC MC-812 б) Внешний вид камеры тепла Binder FED 53

Для измерений при повышенной температуре выбрана камера тепла Binder FED 53 (рисунок 26). Камера имеет следующие основные особенности:

- диапазон температур от $(t \text{ помещения} + 10)^\circ\text{C}$ до 300°C ;
- вариация температуры при 150°C – $1,4^\circ\text{C}$;
- флуктуация температуры при 150°C – $0,3^\circ\text{C}$;
- время нагрева до 150°C – 15 мин;
- время восстановления после открытия дверей на 30 сек до 150°C – 4 мин.

Обе камеры имеют отверстия для вывода электрических кабелей и магистралей подачи давления. Отверстия закрываются вставками из термоизолирующей резины, которые обеспечивают поддержание требуемой температуры внутри камеры. Электрическое питание и требуемое давление подается от источников, расположенных вне камер. Также вне располагается система сбора и обработки результатов. Совокупность данных требований приводит к следующей конфигурации испытательно-измерительного комплекса (рисунок 3).

Рисунок 3 – Блок-схема испытательно-измерительного комплекса

Подача напряжения на высокотемпературный преобразователь давления осуществляется с использованием источников питания. Вольтметр, соединенный с автоматизированной системой сбора данных на основе ПЭВМ, выполняет измерение выходного напряжения преобразователя. Давление на преобразователь подается с использованием пневматического калибратора давления Mensor CPC8000, который подходит как эталонное средство передачи единицы давления вследствие метрологических характеристик для большинства задач калибровки и/или поверки средств измерения давления. Система сбора данных записывает значения выходного напряжения преобразователя. Использование ПЭВМ для системы сбора данных позволяет проводить расчет выходных характеристик преобразователя сразу же после измерений с применением специализированного программного обеспечения.

Возможности оборудования, использованного в испытательно-измерительном комплексе, позволяют проводить автоматизированные измерения путем объединения различных компонентов в сеть и управления с помощью программного обеспечения,

установленного на ПЭВМ. Более того, при необходимости возможно удаленное управление измерениями путем организации доступа к ПЭВМ по каналу Ethernet. В данной работе проведена разработка испытательно-измерительного комплекса для высокотемпературных преобразователей давления. Структура комплекса оптимизирована с учетом расширенного температурного диапазона. Комплекс включает климатическую камеру, камеру тепла, датчик давления, ПЭВМ и другие компоненты. Структура комплекса позволяет проводить автоматизированные и удаленные измерения.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0245, уникальный идентификатор ПРИЭР RFMEFI57717X0245). В работе использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" (ЦКП НПК "Технологический центр").

1. Li S. et al, A novel SOI pressure sensor for high temperature application // 2015 J. Semicond. 36 014014.
2. Jiang X., High-Temperature Piezoelectric Sensing, Sensors 2014, 14, pp. 144-169.
3. Niu Z., Zhao Y., and Tian B., Design optimization of high pressure and high temperature piezoresistive pressure sensor for high sensitivity // Review Of Scientific Instruments 85, 015001 (2014).
4. Kurtz A. D., Ned A. A., and Epstein A. H., Ultra High Temperature Miniature SOI Sensors for Extreme Environments // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17-20, 2004.
5. Ned A. A., Kurtz A. D., Beheim G., Masheeb F., Stefanescu S., Improved SiC Leadless Pressure Sensors For High Temperature, Low and High Pressure Applications, Twenty-First Transducer Workshop Lexington, Maryland, June 22-23, 2004.
6. Guo S., Eriksen H., Childress K., Fink A., Hoffman M., High temperature smart-cut SOI pressure sensor // Sensors and Actuators A 154 (2009) pp.255–260.

Горленко Н.П.¹, Саркисов Ю.С.¹, Павлова А.Н.¹, Сырякин В.И.², Клестов С.А.²
Представления о волновом механизме процессов структурообразования
цементных композиций

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
(Россия, Томск)

doi:10.18411/spc-12-10-2018-03

idsp: 000001:spc-12-10-2018-03

Введение

В настоящее время цифровые технологии в исследовании физико-химических и эксплуатационных свойств строительных материалов позволяют оценить степень их неоднородности, выявить дефекты структуры, определить размеры пор и распределение их по объему образца. Известно, что внутреннее состояние системы «цемент-вода» зависит от множества факторов и в целом определяется формированием капиллярно-пористой трехфазной системы (твердая фаза - вода – вовлеченный воздух). Объемы непрореагировавшей части цемента, гелевых и капиллярных пор в значительных пределах изменяются во время твердения цемента. Управлять их развитием, а, следовательно, управлять и свойствами строительных материалов можно лишь на основе получения новых экспериментальных данных и детального анализа развития данных процессов. Это позволяет реализовать экспериментальные возможности цифровых технологий применительно к цементным композициям, причем в режиме реального времени, что неизбежно приведет к расширению представлений о механизме твердения вяжущих веществ.

Материалы и методы исследования

В работе использовался интеллектуальный рентгеновский 3D микротомограф (ИРМТ) со следующими основными характеристиками: различимость деталей (1-13) мкм; источник рентгеновского излучения- плавно-настраиваемый от 20 до 160 кВ; ток анода (0 – 250) мкА; размер фокального пятна < 5 мкм; охлаждение – воздушное; детектор рентгеновского излучения: 4872×3248 ячеек при размере одного элемента не более 7,4×7,4 мкм; время восстановления трехмерных изображений (1 см³) - 10 мин.

ИРМТ позволяет изучать участки образцов под любым удобным ракурсом и с высокоточным обеспечением (± 1 мкм) позиционирования исследуемого объекта без их разрушения и повреждения.

В качестве объекта исследования использовались образцы цементного камня размером $(2 \times 2 \times 2) \times 10^{-3}$ м, полученные на цементе марки ПЦ-500 при В/Ц = 0,34 в условиях влажного твердения.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные изображения слоев цементного камня по мере увеличения глубины сканирования цементного камня.

Рисунок 2. Изображения поверхности цементного камня (а,б,в,г,д,е) с шагом по увеличению глубины сканирования - 4 мкм. (Увеличение $\times 5$).

Из анализа изображений поверхности цементного камня по глубине сканирования следует:

1. Распределение пор по площади и объему образцов носит случайный характер, а суммарная площадь пор на разных глубинах сканирования не является величиной постоянной.
2. Размеры пор формируются в диапазоне от 10-2 до 10-3 мкм в диаметре и на глубину от нескольких единиц до нескольких сотен микрометров.
3. Воздушные включения имеют как симметричные, так и не симметричные формы, что может быть связано с градиентами плотностей или их

отсутствием на границах раздела фаз «цементный камень-воздух», в момент потери вязкотекучего состояния цементной смеси (конец срока схватывания).

4. Визуально наблюдаются чередующиеся концентрические кольца на поверхности образцов, конфигурация которых меняется с изменением глубины сканирования. Однако расстояние между двумя минимумами впадин (темные кольца) или максимумами выступов (светлые кольца), остается практически постоянным, и ее среднее значение составляет 0,006 м.

Одной из причин, вызывающих формирование концентрических колец на поверхности образцов, на наш взгляд, может являться развитие процесса генерирования электромагнитных волн в объеме твердеющей системы. Известно, что протекание процессов гидратации и твердения цемента сопровождаются возникновением акустических колебаний частотой от 100 Гц до 20 кГц с интенсивностью 3–10 дВ, сопровождающих процессы диспергирования частиц цемента [1]. Можно предположить, что в системе «цемент-вода», особенно в момент затворения цемента водой возникают и более высокочастотные, в том числе, ультразвуковые колебания.

Этот вывод следует из следующих рассуждений. Допустим, что ультразвуковые колебания являются одной из возможных движущих сил диспергирования частиц цемента, а формирование колец является результатом образования стоячих волн в системе «цемент-вода» (рис. 3).

Рисунок 3. Схема образования стоячей волны. В - узлы стоячей волны, А-амплитуды колебаний, λ - длина волны.

Стоячие волны образуются, если две волны с одинаковыми амплитудой и длиной перемещаются в противоположные стороны. Это возможно, если электромагнитные колебания генерируются частицами или их образованиями, составляющими основную массу близких, в частности, по типоразмерам и свойствам. Другими словами, система представляет совокупность частиц с более или менее равномерно распределенными параметрами в образце, в котором, например, масса, упругость, размеры и другие показатели, являются близкими по значению в каждом элементарном объеме системы.

Известно, что под действием давления ультразвуковых волн наименьшие по размеру частицы и жидкая фаза будут отклоняться к узлу стоячей волны, а более крупные образования - в сторону наибольшего значения амплитуды колебаний [2]. В результате будут образовываться очаги уплотнения у поверхности соприкосновения источника электромагнитного излучения (темные кольца), за пределами которого будет располагаться участок с меньшей плотностью образований (светлые кольца) [3]. При этом, значение длины стоячей волны определяется как двойное расстояние между темными и светлыми кольцами на поверхности цементного камня и в среднем составляет 0,012 м (рис. 2).

Частота колебаний ультразвуковых волн в исследуемой среде определяется уравнением:

$$f = c/\lambda$$

где c - скорость распространения ультразвука в твердеющей системе, λ - длина волны, f - частота колебаний.

Учитывая, что в начальный момент твердения система представляет собой жидкую среду и скорость распространения ультразвука здесь условно можно принять равной скорости распространения волны в воде (1490 м/с). По мере формирования цементного камня она увеличивается и варьируется в интервале (1930-3000 м/с) [4].

Рассчитаем частоту колебаний стоячих волн согласно вышеприведенной формуле:

$$f = (1490 - 3000)/0,012 = (124,2 - 250,0) \text{ кГц.}$$

На самом деле, как следует из рис. 1, стоячие волны характеризуются целым спектром частот, включающих кратные между собой гармоники, вследствие чего следует ожидать более широкий интервал частот. А именно, от звукового до мегагерцевого диапазона, наблюдаемых экспериментально [4].

На наш взгляд, источником генерации электромагнитных волн является частота собственных колебаний частиц в цементной системе, которую можно оценить по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$$

где f - частота собственных колебаний тела, $k = F/l$ - коэффициент пропорциональности, представляющий собой упругую силу, приходящуюся на единицу длины связи, $l = 2r$; m - масса частицы.

В начальный момент твердения цементный раствор представляет собой коллоидную систему с размерами частиц ($10^{-6} - 10^{-8}$) м. Принимая плотность цементного теста равной 1400 кг/м³, определим массы отдельных частиц:

$$m = V\rho = (10^{-6}-10^{-8})^3 \times 1400 \approx (10^{-15} - 10^{-21}) \text{ кг.}$$

Для частиц, проявляющих диполь-дипольное взаимодействие, $k = (0,9-1,8) \times 10^{-7}$ кг/м [5].

Тогда:

$$f = 0,16 \sqrt{\frac{(0,9-1,8) \times 10^{-7}}{(10^{-15} - 10^{-21})}} = (2 \times 10^3 - 1,5 \times 10^6) \text{ Гц}$$

Таким образом, если в системе находятся совокупность близких по размерам и массе частиц, то при генерации собственных электромагнитных колебаний возможно формирование стоячих волн с частотами акустического и ультразвукового диапазонов. Так как преобразование энергии из кинетической формы в потенциальную и обратно происходит в пределах участка системы (рис.3), а именно, от амплитуды до соседнего узла, то отсутствуют энергетические потери, так как каждый такой участок не обменивается энергией с соседними участками, что характерно для стоячих волн. Отсутствие энергетических потерь может являться одной из причин интенсификации процессов диспергирования, гидратации частиц цемента и структурообразования цементного камня. Отсюда следует, что создание условий поддержания в системе состояния стоячих волн, может служить дополнительным источником улучшения эксплуатационных характеристик цементных композиций.

Косвенным доказательством эффективного влияния ультразвука на процессы интенсификации процессов гидратации, диспергирования, структурообразования являются многочисленные литературные данные [6,7]. Можно предположить, что генерирование внутренних электромагнитных волн в объеме системы «цемент-вода» в

начальные сроки твердения является, наряду, например, с тепловым воздействием дополнительным активирующим фактором на развитие процессов твердения.

Следует отметить, что формирование сферических «колец» может наблюдаться и при условии состояния сферической бегущей волны. Это обусловлено различными скоростями распространения поперечных C_1 и продольных C_2 волн. Их отношение зависит от коэффициента Пуассона, характеризующего величину отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}}$$

где V_1 , V_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно, ν – коэффициент Пуассона.

Принимая во внимание, что для бетона $\nu=0,2$ [8]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1-2 \times 0,2}{2-2 \times 0,2}} = 0,375.$$

С учетом приведенных расчетов твердеющую систему можно рассматривать как среду с электромагнитным импедансом, где $V_1 < V_2$, что и приводит к образованию визуально наблюдаемым сферическим кольцам.

Заключение.

Показано, что при твердении системы «цемент-вода» одной из возможных движущих сил процессов гидратации и диспергирования частиц цемента может являться генерация внутренних электромагнитных колебаний с частотами акустического и ультразвукового диапазонов, что позволит в будущем создать волновую теорию твердения цементных композиций.

1. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 99–110.
2. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочное пособие. – Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.
3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1961. – 404 с.
4. Колесников В. Г. Электроника: энциклопедия, 1991. – 688 с.
5. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С. Низкоэнергетическая активация дисперсных систем. Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 264 с.
6. Осипов Ю.Р., Воропай Л.М., Сеничев В.П., Шлыков С.А. Эффективность применения ультразвука в производстве древесно-цементных композиций. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2015. – Т.1. – С. 1–10.
7. Соломатов В.И., Тахиров М.К. Интенсивная технология бетонов. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 69–75.
8. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 1. – Механика. – С. 414–560 с.

Ефремкин С.И., Грицун Б.М., Савчиц А.В.

Разработка автоматизированной системы управления биореактором для выращивания микроводорослей

*Волжский политехнический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»
(Россия, Томск)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-04

idsp: 000001:spc-12-10-2018-04

Аннотация

В статье обосновывается перспективность создания автоматизированной системы управления биореактором для выращивания микроводорослей. Это

объясняется малым количеством производимых на территории России аналогов, несмотря на реальный положительный экономический эффект от получаемого продукта. Концентрат биоматериала, получаемый из данного биореактора, в дальнейшем может использоваться в различных отраслях деятельности человека. Примерами использования могут служить: применение в медицине, добавки в корма животных в сельском хозяйстве, альголизация водоемов и т.д.

Ключевые слова: Автоматизированная система управления, биореактор, микроводоросли.

В настоящее время в России слабо распространено производство биореакторов с наличием автоматизированной системы управления. Биореактор это сложный объект управления, который требует качественно подобранных режимов управления для продуктивного выращивания конкретного биоматериала. Применение данного биоматериала обуславливается его широким биологическим составом, а именно наличием большого количества белка, полного набора незаменимых аминокислот, углеводов, жиров, витаминов и биологических стимуляторов [1].

При поиске существующих биореакторов и систем управления ими было найдено много фирм-производителей, но, как правило, все они были иностранной территориальной принадлежности. Соответственно, стоимость при заказе биореактора в этих фирмах будет колоссальной, что принесет отрицательный экономический эффект [2].

В связи с этим было принято решение разработать собственный биореактор и автоматизированную систему управления им. Такая разработка позволит не зависеть от иностранных разработок в данной области, будет способствовать развитию сельского хозяйства в стране, поддержанию экологической безопасности на должном уровне, следовательно, принесет положительный экономический эффект.

За счет самостоятельного производства микроводорослей:

- уменьшится количество закупок биоматериала за рубежом;
- появится возможность лабораторного исследования биоматериала без излишнего волнения о его гибели.

Рисунок 1 – Структурная схема биореактора (1– емкость с выращиваемой средой, 2 – емкость с водой для нормализации температуры, 3 – ТЭН, 4 – змеевик, 5 – аэратор, 6 – лампа светодиодная, 7 – емкость с питательными веществами)

За основу биореактора была взята герметичная емкость, объемом 80л, в которую заливают биоматериал и соответствующую среду, в которой будет происходить размножение. Использование герметичной непрозрачной емкости позволит

существенно ограничить влияние внешней среды на среду выращивания микроводоросли. Предварительно вода нагревается до заданного значения температуры комфортного размножения биоматериала. Также по мере выращивания микроводорослей температура воды поддерживается на этом уровне. Среда в емкости обогащают кислородом посредством аэрации и ежедневной подачей питательных веществ. Для сброса избыточного давления, образовавшегося в емкости, предусмотрен клапан. На рисунке 1 показана структурная схема биореактора.

Процесс выращивания занимает несколько дней. По достижению необходимого размера колонии водорослей, биоматериал выкачивают из емкости, после чего процесс можно повторять неоднократно.

Таким образом, применение и развитие данной разработки в системе автоматизации является целесообразным, так как получаемый биоматериал обладает универсальностью использования, а сам биореактор прост в реализации и позволяет получать заданное количество выходного продукта за заданный промежуток времени.

При выборе средств автоматизации предпочтение отдаётся приборам низким по стоимости, в виду того, что биореактор имеет экспериментальный характер.

Для контроля температуры используется датчик термосопротивления. Измерение подобных датчиков основано на эффекте изменения сопротивления чувствительного элемента датчика при изменении температуры [3]. Выбор датчика термосопротивления обусловлен высокой точностью измерения и конструктивными особенностями. Для преобразования выходного сигнала с датчиков термосопротивления используем нормирующий преобразователь.

Для контроля давления газа в емкости используется датчик давления с тензорезистором. Принцип действия основан на изменении собственного сопротивления тензорезистора в зависимости от деформации упругого элемента, прикрепленного к нему. Выбор обусловлен конструктивной особенностью и диапазоном измерения, для низкой погрешности.

Для измерения уровня в емкости со средой выращивания микроводоросли и в промежуточной емкости используем емкостной датчик уровня. Принцип действия данного датчика основан на изменении емкостного сопротивления в связи с внешними изменениями [3]. Выбор датчика обусловлен особенностью конструкции и простотой в эксплуатации.

В качестве исполнительных механизмов в системе используются электромагнитные клапаны. Для освещения среды в биореакторе используем светодиодные ленты разного спектра.

Разработанная система управления биореактором использует современное оборудование, что обеспечивает качественный уровень контроля над технологическим процессом и внесения своевременного регулирующего воздействия. Для данной системы управления необходимо только содержание установки в помещениях, в которых реактор не будет подвергаться прямому солнечному освещению. С экономической точки зрения, оценочная стоимость такой системы оценивается в 15-20 тыс. рублей, что не является большой стоимостью, как для производства, так и для хозяйств.

1. ООО «Башкирская птица». Технология. Хлорелла [Электронный ресурс] – Ресурс доступа: <http://башптица.рф/hlorella-ru/> (Дата обращения 09.09.2018)
2. Производители биореакторов [Электронный ресурс]. – Ресурс доступа: <http://bioreactors.net/ru/all-bioreactor-manufacturers/> (Дата обращения 10.09.2018)
3. Комаровская Н. М. Технические средства автоматизации и измерения в химическом производстве и в машиностроении [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Н. М. Комаровская, Л. И. Медведева ; ВолгГТУ, ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград : ВолгГТУ, 2009. - 224 с.

Женжурист И.А.**Микроволновое спекание алюмосиликатных композиций – перспективная технология керамики***Казанский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия, Казань)**doi:10.18411/spc-12-10-2018-05**ids: 000001:spc-12-10-2018-05*

Эффективность и экологическая безопасность является важной задачей для технологии получения любых материалов и особенно керамических как обжиговых. Спекание является основным этапом при формировании структуры обжигового материала. Энергетически рациональное проведение спекания в технологии керамики является актуальной задачей как с точки зрения эффективности технологии, так и с экологической точки зрения, поскольку энергия электромагнитного поля не связана с сжиганием топлива и вредным выбросам в атмосферу. Кроме этого, возрастающая потребность в высоких эксплуатационных характеристиках, прежде всего прочностных, материала связана с усложнением и удорожанием технологии. Стремление к получению совершенной структуры материала приводит к необходимости использования высокодисперсных, даже наноразмерных компонентов, проведение процессов фазообразования на начальных стадиях структурных преобразований сырьевых композиций и спекание в условиях минимальных скоростей рекристаллизационных процессов. Эти условия необходимы для получения мелкозернистой структуры материала, при которой достигаются повышенные эксплуатационные характеристики материала, и могут быть осуществлены при спекании в микроволновом (СВЧ) электрическом поле.

СВЧ-излучение обеспечивает избирательный нагрев поглощающих излучение компонентов с высоким коэффициентом полезного использования энергии, высокую мощность нагрева (более 100 Вт/см³), минимальную инерционность нагрева. Нагрев характеризуется способностью материала поглощать СВЧ энергию и преобразовывать ее в теплоту реагентов.

Изучение поведения различных алюмосиликатных композиций под действием импульсного микроволнового излучения показало повышенную прочность обожженного материала, связанную с возрастанием дисперсности исходных минеральных образований, изменением структуры тонкой фракции в процессе кристаллизации, увеличение доли фазовой структуры наноразмерного уровня [1, 2]. Эти процессы связаны с валентными и деформационными колебаниями связей кремне- и алюмосиликатных каркасов, деформацией силоксановых групп, переориентацией зарядов, что способствует повышению реакционной активности на границе раздела фаз, образованию ассоциатов и в присутствии модификатора - характерных структур [1]. При получении алюмосиликата активация композиции в поле СВЧ, особенно в присутствии нано-размерной алюмооксидной добавки, приводит к значительному повышению прочности материал (рис. 1). У модифицированных образцов фиксируется наличие наноразмерной фазы [1].

Эта технология работает в оксидных композициях и осложняется в полиминеральных массах из-за различной реакции каждого компонента сырьевой смеси на поле СВЧ. Технология перспективна для получения материала на основе сырьевых композиций, состоящих из минералов, которые входят в состав обожженного керамического материала, прежде всего кварца и муллита [4]. Известны примеры спекания силикатно-щелочной композиции в микроволновой печи [3, 4]. В качестве распространенного и сравнительно дешевого связующего может быть использовано

жидкое стекло (рис. 2). Получены образцы, по прочности превышающие образцы после термообработки традиционным для керамики обжигом в печи.

Рис. 1. ИК-спектр увеличенной зоны основного спектра и микроструктуры золь 10% водных суспензий: бентонитовой глины (М), бентонитовой глины + СВЧ, бентонитовой глины + СВЧ + 0,1% АЗ-1.

Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие от давления прессования образцов на основе: 1, 2 – асбеста, 3, 4 – золи

Таким образом, спекание композиций, состоящих из высокотемпературных минералов или компонентов, ранее подвергнутых термической обработке, таких как зола, металлургические шлаки возможен с помощью энергии поля СВЧ и наиболее предпочтителен с точки зрения энергоэффективности и длительности термообработки материала. Для волокнистого минерала асбеста, который после 500-600°C теряет свои прочностные характеристики, такая технология позволит получить материал с хорошими прочностными показателями.

Перспективны исследования для спекания в поле СВЧ композиций, содержащих в своем составе аморфный кремнезем, который содержится в диатомите, трепеле, силикатном стекле, который присутствует в многочисленных вулканических породах, в дегидратированной глине, кварцевом стекле, в различных техногенных отходах, таких как микрокремнезем и кремнегель.

Поскольку все сырьевые материалы, независимо от их агрегатного состояния, обычно находятся в неактивном состоянии и при комплексной обработке могут приобретать химическую активность в результате энергетического взаимодействия на границе раздела фаз. Процессы образования новых фаз и спекание керамики начинаются с момента контактирования поверхности зерен минеральных частиц и жидкой фазы при нагреве. Управляя электроповерхностными свойствами взаимодействующих частиц, можно воздействовать на процессы структурообразования материала. С этих позиций могут быть важны исследования влияния поля СВЧ на композиции, в состав которых входит добавка на основе аморфного кремнезема.

1. Женжурист И.А. Микроволновая обработка силикатов полем СВЧ с модификаторами на основе оксида алюминия // Стекло и керамика. 2015. № 7. С. 39–43.
2. Знаменский Л.Г., Варламов А.С. Низкотемпературный синтез муллита в керамике по золь-гель процессу при электроимпульсном воздействии на коллоиды // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 4-5. С. 2–5.
3. Женжурист И.А. Микроволновое спекание – перспективная технология для керамики. Новые технологии в промышленности, науке и образовании: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак. АМИ, 2017. С. 53-56.
4. Женжурист И.А. Перспективы микроволнового спекания алюмосиликатной композиции в технологии керамики // Строительные материалы. 2017. № 4. С. 1-3.

Косарева-Володько О.В., Чепкасов А.И.

Повышение надежности электропередачи

с помощью коммутационного аппарата – Реклоузер

Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС"

doi:10.18411/spc-12-10-2018-06

idsp: 000001:spc-12-10-2018-06

Аннотация

В данной статье рассмотрен интеллектуальный коммутационный аппарат, объединяющий в одном устройстве силовой вакуумный выключатель наружного применения с интегрированной системой измерения токов и напряжений.

Ключевые слова: коммутационный аппарат; пункт автоматического секционирования – реклоузер; масляный выключатель; вакуумный выключатель; надежность.

Abstract

In this article considers an intelligent switching device that combines a power vacuum switch of external application in one device with an integrated system for measuring currents and voltages.

Keywords: switching device; automatic partitioning point - recloser; oil circuit breaker; vacuum switch; reliability.

Наиболее лучшим способом повышения надежности электропередачи по воздушным сетям является реализация автоматического подхода к управлению аварийными режимами, обеспечение полной независимости работы пунктов

секционирования от внешнего управления. Данный подход получил название децентрализованного управления. В такой системе каждый аппарат - это интеллектуальное устройство, анализирующее режимы работы электрической сети, локализирующее место повреждения и осуществляющее восстановление электроснабжения на неповрежденных участках сети.

Данным требованием полностью соответствует пункт автоматического секционирования - реклоузер.

Реклоузер РВА/TEL — это интеллектуальный коммутационный аппарат, объединяющий в себя силовой вакуумный выключатель наружного применения с интегрированной системой измерения токов и напряжений и микропроцессорный шкаф управления с продвинутыми функциями защит и автоматики, специально адаптированными под нужды воздушных распределительных сетей.

РВА/TEL предназначен для выполнения следующих функций:

- автоматическое отключение поврежденных участков линии;
- АПВ;
- АВР;
- оперативная местная и дистанционная реконфигурация сети;
- самодиагностика;
- измерение параметров режимов работы сети;
- ведение журналов оперативных и аварийных событий в линии;
- управление на дистанции.

Так же реклоузер РВА/TEL обладает следующими отличительными особенностями:

- отсутствие необходимости в обслуживании;
- интеграция в системы диспетчерского управления;
- специальные функции РЗА;
- удобство и простота монтажа на опоры линий;
- встроенная система измерения токов и напряжений с двух сторон коммутационного модуля;
- использование комбинированной твердой и воздушной изоляции в конструкции коммутационного модуля;
- надежная система бесперебойного питания;
- малые массогабаритные показатели;
- вандалозащищенность.

Шкаф управления выполняет следующие функции:

1. Управление коммутационным модулем;
2. РЗА;
3. Индикация и измерения;
4. Сбор и обработка информации.

Основными элементами шкафа управления являются модуль микропроцессора, модуль управления и модуль бесперебойного питания.

В вакуумном реклоузере РВА/TEL реализованы следующие виды защит и автоматики:

- токовая защита от междуфазных КЗ;
- защита от ОЗЗ;
- ЗМН;
- АПВ;
- АВР;
- АЧР.

Настоящий стандарт организации распространяется на реклоузеры номинальным напряжением 6 - 35 кВ, предназначенные для применения в воздушных распределительных сетях в качестве автоматического пункта секционирования ответвлений сети, а также в проектах реконструкции подстанций. Данный аппарат лучше всего использовать в труднодоступных местах, в частности в горной отрасли, где зачастую трудно проводить ремонтно-монтажные работы.[1]

По общепринятой классификации реклоузер является комплектным распределительным устройством наружной установки (КРУН). Однако некоторые особенности реклоузеров позволили их выделить в отдельный класс:

1. Реклоузеры компактны и могут размещаться на опорах ЛЭП, не требуют фундаментов и ограждений;
2. Реклоузеры относятся к классу необслуживаемых устройств, то есть могут годами работать без присутствия человека, что особенно важно для труднодоступных и удаленных районов;
3. Реклоузеры не только выполняют функции защиты, но и обладают "зачатками интеллекта" - после аварии на линии реклоузер несколько раз пытается восстановить питание и, при неудаче, посылает сообщение оператору.

Вакуумный выключатель, используемый в реклоузере отличается от стандартных модификаций меньшим междуполосным расстоянием, более усиленной изоляцией и иным расположением высоковольтных вводов.[2]

Проведем сравнение вакуумных выключателей, используемых в реклоузере и масляные выключатели используемые на данный момент:

Достоинства вакуумных выключателей:

- простота конструкции (отсутствие клапанов, компрессоров и других вспомогательных устройств) и надежность в работе;
- относительно малые габариты и масса;
- отсутствие сжатого воздуха или трансформаторного масла;
- небольшое время отключения (0,03-0,05 с);
- отсутствие масла и других горючих материалов (взрывобезопасность);
- более высокая скорость восстановления прочности дугогасительного промежутка (отсутствие шунтирующих резисторов);
- бесшумная работа;
- отсутствие выбросов в атмосферу;
- удобны для отключения емкостной нагрузки;
- значительный ресурс при коммутации номинального тока (30...50 тысяч операций);
- произвольное положение камеры;
- отсутствует ударная нагрузка на фундамент, характерная для масляных выключателей;
- вакуумные выключатели позволяют создать малогабаритные (многоэтажные) КРУ;
- малый ход и скорость контактов позволяют применять легкие, небольшие пружинные или электромагнитные приводы;

Недостатки вакуумных выключателей:

- вблизи нуля наблюдается срез тока, сопровождающийся перенапряжениями при отключении малых индуктивных токов;
- в выключателях на напряжении выше 35 кВ несколько камер необходимо соединять последовательно;
- требуют наибольших капиталовложений, что определяет довольно высокую их стоимость.

Достоинства масляных выключателей:

- относительная простота конструкции;
- большая отключающая способность и независимость от атмосферных явлений.

Недостатки масляных выключателей:

- особенность баковых выключателей является наличие большого количества масла, что приводит к наибольшим габаритам и массам как самих выключателей, так и распределительных устройств;
- повышенной пожаро- и взрывоопасности;
- необходимости специального масляного хозяйства.

Сравнив достоинства и недостатки выключателей, можно прийти к выводу, что для обеспечения надежности наиболее перспективным считается выбор реклоузера, включающего в себя вакуумный выключатель. [3]

График надежности масляного выключателя и вакуумного представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 - Изменение вероятности безотказной работы с течением времени

Выбор реклоузера осуществляется по следующим параметрам:

1. Выбор по условиям рабочих продолжительных режимов:

$$U_{ном} \geq U_{ном.сети} \quad (1)$$

$$I_{ном} \geq I_{ном.расч.} \quad (2)$$

2. Выбор по коммутационной способности:

$$I_{вкл} \geq I_{П.О.} \quad (3)$$

$$I_{пр.скв.} \geq I_{П.О.} \quad (4)$$

$$i_{пр.скв.} \geq i_{увд} \quad (5)$$

Проверка осуществляется по следующим параметрам:

1. Проверка на электродинамическую стойкость:

$$i_{вкл.} \geq i_{уд.} \quad (6)$$

2. Проверка по термической стойкости:

$$I_{терм.}^2 \cdot t_{терм.} \geq B_k = \int_{откл}^{откл} i_k^2 \cdot dt \quad (7)$$

3. Проверка на коммутационную способность:

$$i_{a.норм} = \sqrt{2} \cdot \beta_{норм} \cdot I_{откл.ном.} \geq i_{a.т} \quad (8)$$

1. Карнаушенко А.Н. Вакуумный реклоузер серии РВА/TEL–средство повышения надежности ВЛ 6-10 кВ//Электропанорама. – 2005. – №10. – С.74–75.
2. Хасанзянов Б. Ф. О реклоузерах С. 188-190.
3. Вакуумный реклоузер. Техническая информация. – С.82.

Матрохин А.Е., Силаев А.А.**Исследование систем управления умным домом***ВПИ (филиал) ВолгГТУ**doi:10.18411/spc-12-10-2018-07**idsp: 000001:spc-12-10-2018-07***Аннотация**

В статье рассмотрены технологии энергосбережения, используемые при проектировании систем «Умный дом». Рассмотрены основные группы систем, их состав, принцип действия и особенности. Дана характеристика проводных и беспроводных технологий обеспечивающих доставку сигнала в системах «Умный дом». Выделены основные подсистемы умного дома, направленные на энергосбережение.

Ключевые слова: умный дом, энергоэффективность, ресурсосбережение, радиочастотные метки, датчики устройств, радиочастотная идентификация.

В настоящее время особую актуальность получают вопросы, связанные с необходимостью экономии энергии. В связи с этим возникает необходимость при проектировании и строительстве современных зданий особое внимание уделять повышению показателей энергоэффективности зданий, для обеспечения экономии электроэнергии и тепла.

Основным предназначением систем «Умный дом» (англ. Smart house) является ресурсосбережение, обеспечение комфорта и безопасности для всех пользователей, что реализуется посредством автоматизации и высокотехнологичных устройств [4].

Системы «умный дом» подразделяются на следующие группы:

— - централизованные системы – состоят из программируемого центрального контроллера, к которому подключаются модули. Высокая производительность позволяет выстраивать сложные алгоритмы управления, завязанные на времени, температуре и состоянии пользователя. Основным преимуществом системы является возможность соединить в единый комплекс все системы жизнеобеспечения [2];

— - децентрализованные системы – автономные системы, в которых отсутствует центральный контроллер. Такие системы состоят из сенсоров и активаторов. При обнаружении какой-либо активности в здании или изменении каких-либо характеристик сенсоры посылают телеграммы активаторам - устройствам-исполнителям, которые, в свою очередь, выполняют подходящие команды. Все устройства подключаются к общей шине (канал связи для компонентов системы) которая также может подключаться к другим шинам, в результате чего создается сложный комплекс переплетения источников сигнала [2]. Устройства в такой системе являются независимыми, так как каждый модуль обладает микропроцессором с энергонезависимой памятью. Децентрализованные системы обладают повышенной надежностью. Если выходит из строя один или нескольких модулей, то это не

оказывает существенного влияния на работу всей системы. Расширение системы осуществляется путем добавления новых модулей, поддерживающих протокол передачи данных используемой шины;

— - системы, основанные на радиоканалах и силовой проводке, представляют собой набор компонентов и узлов, которые могут использоваться дистанционно, по радиосигналам, для управления различными источниками света. Установка такой системы не требует специального программного обеспечения. Дополнение системы новыми компонентами, повышающими комфорт и безопасность здания возможно в любой момент. Принцип действия системы заключается в отправке радиопередатчиком управляющих сигналов, которые могут принимать все радиоприемные устройства, при этом команды выполняют устройства, настроенные на прием конкретного сигнала от радиопередатчика. Питание радиопередатчиков осуществляется от батарей или от внешнего источника, что дает возможность использовать их даже при отсутствии электричества. Доставка сигнала в системах «Умный дом» обеспечивается по проводным и беспроводным сетям.

Для обеспечения связи используются следующие технологии: открытый европейский стандарт KNX/EIB (Konnex) объединивший в себе несколько технологий управления (Batibus, EIB и EHS) и обеспечивающий поддержку всех стандартных протоколов передачи данных в любых передающих средах (IP сетях, витых парах, силовых линиях, радиоканалах); открытый протокол Smart-bus; стандарт LonWorks, используемый для управления климатом, системами безопасности и учета ресурсов для зданий; протокол X10 (управление электроприборами); беспроводные технологии Wi-Fi, ZigBee и Z-wave [4].

Наибольшей надежностью и скоростью обладают проводные технологии, предусматривающие соединение всех элементов умного дома с помощью проводов. Этим обеспечивается высокая скорость работы системы, надежность и защищенность от внешних воздействий. Выполнение измерений датчиками только по запросу позволяет достигнуть высокого уровня энергоэффективности.

К недостаткам проводных технологий следует отнести необходимость прокладывать слаботочную кабельную сеть, а также увеличивать количество кабелей в системе. Если датчики и исполнительные устройства расположены в удаленных или труднодоступных местах, возникает необходимость в использовании беспроводных технологий. При этом функционал беспроводных технологий существенно ограничен. Разработчиками не предусмотрена возможность обеспечения обратной связи пульта управляющего устройства с датчиками устройств, чтобы не зависеть от быстро разряжаемых источников питания, в результате чего у пользователя отсутствует информация о выполнении команды. Если заканчивается срок службы источников питания пульта управления, происходит сброс всех настроек системы. К недостаткам беспроводной технологии следует отнести: влияние внешней окружающей среды на качество связи (погода, время суток, помехи); зависимость скорости от степени нагрузки радиосети; ограниченность радиочастотного ресурса; несовместимость оборудования разных производителей.

В настоящее время все более широкое распространение получает технология радиочастотной идентификации (RFID – Radio Frequency IDentification), обеспечивающая автоматическую бесконтактную идентификацию объектов посредством радиочастотного канала связи.

С помощью радиосигнала считываются или записываются данные, которые хранятся в так называемых транспондерах, или RFID-метках.

Системы RFID состоят из считывающего устройства (считывателя) и транспондера (RFID-метки). Объекты идентифицируются по уникальному цифровому коду, который считывается из памяти электронной метки, прикрепленной к объекту идентификации. Считыватель имеет передатчик и антенну, с помощью которых осуществляется излучение электромагнитного поля определенной частоты.

Радиочастотные метки, которые оказываются в зоне действия считывающего поля «отвечают» собственным сигналом, передавая зашифрованную информацию. Антенна считывателя улавливает сигнал, после чего происходит расшифровывание и компьютерная обработка информации.

Технология RFID в системе «Умный дом» обеспечивает возможность включения и выключения электроприборов только определенному лицу, что позволяет ограничить неконтролируемый доступ. Модули RFID, расположенные на панели включения различных электроприборов, позволяют блокировать его нежелательное включение ребенком. Такой прибор будет включаться только при соприкосновении RFID модуля с RFID меткой, которая может быть расположена, например, на брелоке у родителей.

Технология RFID характеризуется высоким уровнем физической надежности средств идентификации, скоростью, а также повышенной надежностью системы в целом, что обеспечивается отсутствием механического износа и децентрализацией обработки информации. Преимуществом является возможность бесконтактного считывания на расстоянии. При этом нет необходимости в механическом, контактном совмещении. Для обеспечения надежного считывания информации с RFID-метки она должна находиться в зоне действия считывателя RFID. Технология RFID может эксплуатироваться в любых условиях, даже в агрессивных средах.

К подсистемам умного дома, направленным на энергосбережение относятся: подсистема управления освещением; подсистема управления климатом помещения; подсистема контроля и управления системами снабжения (электричество, газ, вода). Остальные подсистемы «Умного дома» направлены только на повышение комфорта проживания [3]. Автоматизация энергосберегающего освещения обеспечивается датчиками движения, расположенными в основных проходных помещениях дома. Система автоматически включает и выключает освещение при обнаружении движения или его отсутствии.

Для управления климатом устанавливаются датчики температуры (снаружи и внутри здания), контроллер, термостат, сервоприводы. Алгоритмы контроля климата позволяют устанавливать оптимальный режим энергопотребления климатических систем. Экономия затрачиваемой на обогрев энергии обеспечивается снижением температуры в ночное время в пустых помещениях, минимизацией работы оборудования в случае отсутствия хозяев.

Контроль и управление инженерными системами и электричеством (защита от протечек систем водоснабжения, контроль отопления и газа) обеспечивается датчиками и контроллером, на который поступает информация от датчиков, после чего осуществляется анализ по заложенным алгоритмам и отправка сигнала на сервопривод задвижек и кранов [3].

Технологии автоматизации, применяющиеся в системах умного дома, используют энергоэффективные алгоритмы управления освещением, приборами отопления и вентиляции, кондиционерами, системами безопасности и контроля доступа, что обеспечивает существенное сокращение расхода энергоресурсов.

1. Гуляев А.Е., Островский Н.А. «Умный дом»: экономические особенности и перспективы использования Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. №5 (21) 2018. [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: <http://www.alley-science.ru/> (дата обращения: 15.09.2018)
2. Егунов В. А. Управление «умным домом» с использованием беспроводного канала связи / В. А. Егунов, Х. А. Ал-Саади // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 6(133). С. 73-75
3. Нусина А.Ю., Семенова О.А. Сравнительный анализ систем «Умный дом». Международный научно-технический журнал «ТЕОРИЯ. ПРАКТИКА. ИННОВАЦИИ». Апрель. 2018.
4. Палагута К.А., И.С. Шубникова И.С., Сафонов А.Л. Умный дом: справочник / под общ. ред. А.Л. Сафонова. – М.: МГИУ, 2015. – 184 с.

Островский А.А., Савчиц А.В., Костин В.Е.
Разработка адаптивного датчика влажности почвы

*Волжский политехнический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»
(Россия, Волжский)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-08

ids: 000001:spc-12-10-2018-08

Аннотация

Одной из актуальных проблем городского хозяйства является обеспечение качественного ухода за зелеными насаждениями. Неотъемлемой частью ухода за растениями является полив, который зачастую осуществляется автоматизированными системами. Однако без наличия обратной связи, вывести процесс на должный уровень качества крайне сложно. Для этого применяются датчики влажности, цена которых неизбежно ведет к сильному удорожанию системы полива. В данной статье рассматривается возможность и целесообразность внедрения в систему датчика влажности, разработанного авторами, который отвечал бы таким положительным критериям как дешевизна, высокая точность и широкий диапазон измерений, высокая антикоррозийная стойкость, универсальность применения.

Сегодня рынок предлагает обширный перечень средств автоматизации полива и их комплектующих. Лидерами в этой сфере являются такие фирмы как Hunter, RainBird и Gardena. При анализе средств измерения влажности почвы, предлагаемых данными фирмами, было выявлено, что все модели обладают высокой ценой (от 5 до 20 тыс. руб. и выше) и некоторые из них не совместимы с системами сторонних производителей.

При поиске средств измерений влажности почвы были найдены китайские дешевые датчики, основанные на резистивном принципе действия, однако дальнейшее тестирование выявило несколько явных недостатков, которые делают невозможным применение их в городской автоматизированной системе полива.

В связи с этим в ВПИ (филиал) ВолгГТУ было принято решение разработать собственный датчик влажности, основанный на емкостном принципе действия. За основу такого датчика взят генератор частоты, выходной сигнал которого зависит от емкости подключенного к нему конденсатора (чувствительного элемента, погруженного в почву).

Рис. 1 – Результаты исследования четырех датчиков влажности почвы

Выполненный обзор свидетельствует, что:

- разработанный емкостной датчик "рис. 1 а" показал во время испытаний, необходимый уровень выходного сигнала и высокую антикоррозийную стойкость.

- датчик влажности "рис. 1 б" показал стабильную выходную характеристику, но по окончании опыта на чувствительных элементах были обнаружены очаги ржавчины;
- датчик влажности "рис. 1 в" показал низкую стойкость чувствительных элементов к коррозии, следствием чего стали ложные показания;

Однако для разрабатываемого датчика характерно колебание диапазона частот в зависимости от применения его в той или иной почве. Чтобы компенсировать этот эффект, решено использовать средство микроконтроллерной техники, которое обеспечит самостоятельную адаптацию датчика под разный тип почвы. Также микроконтроллер обеспечит связь с главным контроллером посредством применения интерфейса RS-485.

На рисунке 2 представлена блок-схема программы адаптации датчиков влажности.

Рис. 2 – Блок-схема программы адаптации датчика влажности почвы

Предложенная схема обеспечивает эффективную работу исследуемого датчика контроля влажности почвы.

Таким образом, применение емкостного датчика влажности почвы в системе автоматизации является целесообразным, так как он обладает универсальностью использования, высокой точностью измерения и антикоррозийной стойкостью.

1. Water control soil moisture sensor // Gardena URL: <https://www.gardena.com/int/products/watering/water-controls/soil-moisture-sensor/900898601/> (дата обращения: 14.11.2017).
2. Soil-Click // Hunter Industries URL: <https://www.hunterindustries.com/ru/product/datchiki-pogody/soil-clicktm> (дата обращения: 14.11.2017).
3. SMRT-Y Soil Moisture Sensor Kit // RainBird URL: <http://www.rainbird.com/landscape/products/accessories/smrty.htm> (дата обращения: 14.11.2017).

Скуднева О.В.

**Безальтернативность беспилотных летательных аппаратов в реалиях
сегодняшней геополитики**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-09

idsp: 000001:spc-12-10-2018-09

Аннотация

В статье приведена история развития беспилотных летательных аппаратов на примере работ по созданию первого беспилотного летательного аппарата, созданного

М.В. Ломоносовым, и первого пилотируемого самолета, созданного А.Ф. Можайским. Дается обоснование целесообразности применения транспортного беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Обосновывается необходимость использования БПЛА для решения экологических задач, в том числе и на промышленных объектах в качестве транспортного средства для оперативной доставки широкого перечня грузов в удаленные поселения. Рассматриваются технические предложения по использованию автоматической навигационной аппаратуры и особенностей построения её структуры. Рассмотрен вопрос о возможности применения беспилотных летательных аппаратов в различных областях народного хозяйства, в работе службы МЧС, в лесном хозяйстве, геологии и метеорологии. Отдельно рассмотрен вопрос применения транспортных БПЛА для решения задач по освоению Крайнего Севера – защите северных рубежей РФ, охране природных ресурсов Северного Ледовитого Океана и освоения Северного морского пути.

В статье показана реальная возможность эффективного мониторинга лесных массивов с применением БПЛА. Охарактеризованы технические возможности БПЛА и условия их эксплуатации, отмечены высокая надежность аппаратов и точность ориентирования с помощью предложенных навигационных средств и систем.

Приведена структурная блок - схема цифрового навигационно-пилотажного комплекса транспортного БПЛА.

Ключевые слова: мониторинг, лесное хозяйство, беспилотный летательный аппарат, навигация, транспорт, доставка грузов, ЦВМ – цифровая вычислительная машина.

Введение. К управляемым без экипажа летательным аппаратам (ЛА) относятся дистанционно пилотируемые и автономно управляемые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетной и вертолетной схемы, а также автоматические космические аппараты. БПЛА могут быть боевыми, разведывательными, а также использоваться в качестве мишеней. В более широком смысле к БПЛА относятся управляемые крылатые ракеты боевого применения.

Весь XX и по настоящее время продолжается их усовершенствование, причем с целью направленной, в конечном счете, против человека, а не для человека.

В данной статье дается попытка предложить разработчикам создавать БПЛА, которые должны решать народно-хозяйственные задачи в качестве транспортного средства, необходимого промышленным предприятиям, лесному хозяйству, службам Министерства обороны и МЧС, геологоразведке, гидрометеослужбе и др., учитывая размеры страны и отсутствие дорог для доставки грузов. Отечественная наука и промышленность в настоящее время обладает достаточной базой для создания таких транспортных БПЛА. Важная роль при разработке транспортных БПЛА отводится к решению задачи замены пилота и штурмана автоматом пилотирования и автонавигатором. Современный уровень развития цифровой техники, программно-математического обеспечения и наличие необходимых комплектующих, а также опыт предыдущих разработок БПЛА, позволит обеспечить выполнение этой задачи. Создание М.В. Ломоносовым первого БПЛА подтверждает аксиому - “Знание прошлого помогает лучше предвидеть будущее”.

История создания БПЛА. Прошло более 250 лет с той поры, как ушёл из жизни наш земляк Михаил Васильевич Ломоносов (08.11.1711-04.04.1765 гг), великий ученый, инженер и поэт, которого Архангельская земля подарила России и миру.

Одним из тех, кто занимался переосмыслением ломоносовского наследия, был академик В.И. Вернадский. Он писал о Михаиле Васильевиче: «На каждом шагу в его творениях встают в поражающей нас в старомодной оболочке факты, идеи и обобщения чуждые XVIII столетию, вновь понятые, открытые и признанные в XIX и XX веках»... и XXI веке.

Примером тому служит созданный им первый беспилотный летательный аппарат, идея которого оказалась востребованной в XX и XXI столетиях.

Следует напомнить, что свидетельства о постройках летательных аппаратов (ЛА) сохранились в древних сказаниях, легендах и старинных рукописях, при этом они лишены конкретных технических решений и возможностей их практической реализации и, скорее всего, отображают мечту человека к полету. А примером тому может служить ковер - самолет.

Исторический факт - первая в мире документированная практическая инженерная разработка ЛА тяжелее воздуха была выполнена М.В. Ломоносовым в 1754г. [1, 6]. Это была модель вертолета и фактически явилась первым беспилотным летательным аппаратом (БПЛА). Он построил модель ЛА, работающего по принципу вертолета с соосными винтами, чтобы поднять над землей метеорологические регистрирующие приборы.

Сообщение о ЛА, разработанным М.В.Ломоносовым, содержится в Протоколе заседания Российской академии наук от 1 июля 1754г, где имеется такая запись: «Господин Советник Ломоносов показал придуманную им машину, которую он называет аэродинамической и назначение которой должно быть в том, чтобы работой крыльев, приводимых в сильное движение пружиной, каковые обычно бывают в часах горизонтально противоположных направлениях, прижимают воздух и поднимают машину в направлении верхней воздушной области с тем, чтобы можно было исследовать условия верхнего воздуха метеорологическими приборами, присоединенными к этой аэродинамической машине. Машина удерживалась в равновесии грузиками, привешенными с противоположной стороны, а при заведенной пружине тотчас поднималась вверх и тем обещала желаемое действие».

В годовом отчете за 1754 г. Ломоносов пишет: «Делал опыты с машиной, которая поднималась кверху сама и могла бы поднять термометр, дабы узнать градус теплоты на вышине...». Значительно позже подобные ЛА были созданы и за границей. При создании данного летательного аппарата М.В. Ломоносов сделал первую в истории практическую попытку применить архимедов винт для воздушного плавания. Особенно впечатляет то, что он, стремясь уничтожить реактивный момент, предусмотрел в своём аппарате два соосных винта, вращающихся в противоположные стороны! В настоящее время этим техническим решением пользуются разработчики БПЛА и вертолётов Конструкторского Бюро Н.И. Камова, широко известных в военной и гражданской авиации.

Так М.В. Ломоносов стал изобретателем и создателем первого ЛА тяжелее воздуха и провозвестником современной авиации, закладывая основы аэродинамики, оформившейся, как наука, лишь в конце XIX-го столетия. Через 30 лет после М.В. Ломоносова, в 1784 году, французским изобретателям Лонуа и Бьенвеню удалось построить небольшой геликоптер-игрушку, поднимающийся в воздух с помощью четырёхлопастного винта, приводимого в движение тетивой от лука.

В конце XVIII-го столетия наступило время полётов ЛА легче воздуха. В 1783 году во Франции братьям Монгольфье удалось осуществить подъём в воздух оболочки, наполненной нагретым воздухом, а следом, в том же году, физик Шарлем и братья Робер, используя передовые достижения своего времени в области химии (водород) и технологии (прорезиненная оболочка), организовали беспилотный полёт воздушного шара. В России первый полёт воздушного шара был совершён в Петербурге в 1783 году и в Москве в 1784 году. Первый полёт в России в научных целях для изучения верхних слоёв атмосферы с экипажем из трёх человек был совершён в 1804 году.

Работами с воздушными шарами заинтересовались военные с целью использования ЛА в пилотируемом и беспилотном вариантах для нужд армии. Надо сказать, что ещё ранее русский полководец Суворов А.В. интересовался возможностью применить воздушные шары на войне и не раз говорил: «Кабы я мог быть птицей, владел бы не одной столицей».

Со временем появились модификации воздушных шаров – аэростатов различного назначения, получивших название свободных, привязанных и дирижаблей. Основными условиями создания управляемого аэростата признавалось: удлинённая

форма оболочки, применение винта и механического двигателя. Главным средством навигации были – магнитный компас, часы и карты местности, позволяющие определить координаты и скорость полёта.

Увлечение воздухоплаванием в XIX столетии не могло не затормозить изобретательской деятельности в области создания ЛА тяжелее воздуха. Наблюдались лишь отдельные попытки создания простейших БПЛА, работы по которым могли использоваться в дальнейшем для создания более совершенных моделей беспилотников. В то же время русскими учёными Д.И. Менделеевым, Н.Е. Жуковским, С.А. Чаплыгиным, К.Э. Циолковским велись научные работы по созданию теории и практики воздухоплавания и авиации, что приближало создание более совершенных ЛА, в том числе БПЛА тяжелее воздуха.

В дальнейшем при разработках ЛА для полета человека на борту в качестве моделей исследований использовались БПЛА. После нескольких удачных запусков таких моделей самолётов, русским изобретателем А.Ф. Можайским впервые был создан самолет в натуральную величину, способным поднять человека, Несмотря на ограничения в материально - техническом обеспечении и при технических возможностях производства XIX века, при недоверии военной бюрократии и ряда ученых, считавших, что «аппарат тяжелее воздуха летать не может», А.Ф. Можайский сумел в 1883 году завершить постройку первого в мире самолета, способного поднять человека в воздух. При этом самолёт состоял из шести основных конструктивных групп, из которых состоит современный самолёт: корпус, крыло, оперение, шасси, управление и силовая установка.

Перспектива развития БПЛА.

В настоящее время в различных странах активно проводятся работы по созданию и использованию БПЛА, в основном, для военных целей, как средство для ведения фото и радио разведки и выполнения боевых задач.

Современные БПЛА находят применение для контроля состояния лесных массивов, обнаружения очагов пожаров и зон затоплений благодаря использованию установленных на БПЛА фото и видеокамер [3]. С высокой эффективностью БПЛА могут вести метеонаблюдения значительных территориях на различных высотах, могут вести контроль ледовой обстановки в море, могут помочь экологам контролировать экологическую обстановку на значительных территориях, могут определять наличие диких животных и вести их учёт, могут помочь рыбакам обнаружить косяки рыб, а также вести контроль за извержением вулканов. Кроме всего этого - вести поиск и оказывать при аварийной посадке помощь попавшим в беду экипажам и пассажирам самолетов и вертолетов, а также терпящим бедствие морякам и охотникам.

Установленная на БПЛА специальная аппаратура может помочь геологам вести поиск районов нахождения полезных ископаемых - алмазов, различных руд, нефти, газа и пр. Наличие БПЛА может помочь службам МЧС при выполнении работ в критических условиях, так, в свое время, беспилотники и роботы могли бы спасти от болезней и гибели многих участников - ликвидаторов Чернобыльской катастрофы.

Следует ожидать, что процесс развития техники в XXI веке приведёт к созданию БПЛА более широкого применения, в том числе в интересах промышленности и при решении народно-хозяйственных задач.

Во многих областях промышленности имеется острая потребность в доставке грузов (продуктов питания, технических средств, медицинского оборудования, газет, журналов и пр.) в удаленные места работы газо- и нефтедобывающих предприятий, работников лесного хозяйства, а также в удаленные поселения рыбаков, скотоводов, геологов, метеорологов и др., в связи с отсутствием круглогодичных транспортных средств, кроме речных и морских судов, самолётов, вертолётот, что значительно усложняет доставку грузов и увеличивает стоимость их доставки. А отсутствие шоссейных дорог ограничивает использование автотранспорта. В связи с этим необходимо рассмотреть целесообразность создания и использования для таких целей транспортных БПЛА.

Этому способствует современное развитие электронной промышленности и цифровой вычислительной техники, а также стимулирует разработку высокоточных, надёжных, недорогих малогабаритных датчиков и систем измерения параметров движения летательных аппаратов при наличии глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). При создании транспортного БПЛА, в связи с отсутствием на борту пилотов и пассажиров, коренным образом меняется подход к разработке конструкции БПЛА. Исчезают жесткие требования по теплоизоляции, герметизации аппарата, поддержанию комфортной температуры и влажности. Подлежат пересмотру нормативы по допустимым нормам для конструкции летательного аппарата по перегрузкам, вибрациям и т.д.

С применением новых высокопрочных материалов из армированных нитей возможно уменьшить массу планера БПЛА в 2-2,5 раза. Такие материалы практически не намокают, поэтому снижается риск обледенения и повреждения корпуса аппарата.

В целом, указанные нововведения позволяют значительно упростить конструкцию и увеличить грузоподъемность БПЛА.

Необходимость в создании транспортного БПЛА вызвана сложностью в поддержании исправности (летной годности) самолетов и вертолетов, трудностью техобслуживания из-за отсутствия ЗИПа, дороговизны топлива и ГСМ, изношенности бортового оборудования, низкого уровня остаточного ресурса двигателей и завершения в ближайшее время выработки ресурса и срока службы у действующего парка самолетов и вертолетов.

Особое место занимает недостаток квалифицированных пилотов и технических кадров для техобслуживания.

В связи с этим необходимо находить другие способы решения задач, стоящих перед авиацией для выполнения транспортных перевозок менее затратных и более эффективных.

Все это вызывает особый интерес к оценке возможности применения транспортных БПЛА различной грузоподъемности, дальности полета, технической оснащенности для их использования в грузоперевозках.

Транспортные БПЛА для Крайнего Севера. В настоящее время в нашей стране защите северных рубежей, охране природных ресурсов Северного Ледовитого Океана и освоению Северного Морского Пути придаётся большое значение. Освоение Арктики происходит в тяжёлых климатических условиях при низких температурах, на вечной мерзлоте, при длительной полярной ночи. Это требует наличия разнообразных технических и материальных средств и значительных капитальных вложений. Известно, что работа в условиях Крайнего Севера требует от работающих там гражданских и военных специалистов значительного напряжения сил, знаний, умения и крепкого здоровья. Завоз тяжёлой техники и других материально-технических средств для создания технических баз и строительства мест для проживания специалистов, а также для поддержания эксплуатации техники и жизнеобеспечения людей, осуществляется морским и речным транспортом, тяжёлой транспортной авиацией и в будущем, возможно, будет выполняться с помощью экранопланов и дирижаблей. Для доставки «лёгких» грузов на месте применяются вертолёты и лёгкие транспортные самолёты со своими достоинствами и недостатками. Для их эксплуатации необходим наличие достаточного количества ЛА и экипажей, выполнение требований по безопасности полётов, выполнение условий погодного минимума, штатное техническое обслуживание, наличие пригодных взлётно-посадочных полос (ВПП). Значительная дороговизна эксплуатации таких ЛА и их сомнительная эффективность требует принятия мер для улучшения положения, поскольку работа в арктических условиях будет продолжаться долго и с нарастанием объёма.

Данную задачу логично было бы решить применением транспортных БПЛА различной грузоподъёмности, лишённых многих недостатков современных пилотируемых ЛА. К сожалению, отечественных транспортных БПЛА нет. На Западе, учитывая большую плотность населения, наличие автодорог и изобилие автомашин,

такие транспортные БПЛА просто не очень нужны. И поэтому, возможно, ими не занимаются. Пока.

Потребность в транспортный БПЛА в России есть: у военных (и не только в условиях Арктики - например, как носителя оружия во время военных действий), у специалистов, занятых освоением Крайнего Севера, у моряков для освоения СМП, у служб МЧС, у специалистов лесного хозяйства [3], геологов, метеорологов, нефтяников на морских платформах. Причина тому – намечающийся прогресс освоения северных территорий РФ, при отсутствии дорог для автотранспорта, огромная площадь освоения нефтяных и газовых месторождений, поддержание и развитие лесного хозяйства и др. Конечно, используя наш российский принцип «пока гром не грянет, поп не перекрестится», можно дожидаться появления транспортных БПЛА из-за границы. Тогда подтвердится аксиома «кто не успел, тот опоздал».

Структура навигационно-пилотажного комплекса БПЛА. Сложной задачей при разработке транспортного БПЛА является создание навигационно-пилотажного комплекса (НПК), обладающего функциями автоматического управления и навигации для замены пилота и штурмана.

Основными требованиями по составу навигационно-пилотажных систем транспортных БПЛА являются:

Высокая надёжность и точность аппаратуры, обеспечивающей требования по безопасности;

Автономность работы в полёте при отсутствии (пропадании) коррекции от радиосредств;

Возможность взаимодействия со штатной ЦВМ и современными цифровыми и штатными аналоговыми приборами;

Минимальная масса и приемлемая стоимость систем.

На рис.1 приведена структурная блок-схема двухканального (1к, 2к) цифрового навигационно-пилотажного комплекса транспортного БПЛА.

Рис.1 Структурная блок-схема цифрового навигационно-пилотажного комплекса транспортного БПЛА.

При разработке и эксплуатации различных летательных аппаратов и прежде всего самолётов, вертолетов и БПЛА, важная роль отводится решению задач автоматического пилотирования и решению навигационных задач - определению начального стояночного и текущего курса, определению скорости и высоты полёта, определению местоположения, программированию маршрута, решению задачи выхода с высокой точностью в промежуточные точки маршрута, а также для выполнения взлёта, посадки, фото и радиоразведки, задач сброса груза и пр.

Эти задачи должны решаться на основе применения бортовой вычислительной машины (БЦВМ) и её взаимодействия с курсовыми системами (КС-1к, КС-2к), датчиками навигационных параметров (ДНП), программатором маршрута (ПМ), с выдачей командных сигналов через блок коммутации каналов (БКК) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на устройства блока исполнения команд (БИК) БПЛА.

Новизна, полезность и технические решения предлагаемого НПК для транспортных БПЛА подтверждается патентами РФ на изобретения [2], [4] и материалами статей [3], [5].

С целью повышения точности навигации в настоящее время применяют спутниковые навигационные системы (СНС) - ГЛОНАСС, GPS, определяющие с высокой точностью навигационные параметры, за исключением курса ЛА, автономным датчиком которого являются две современные высокоточные курсовые системы.

К сожалению, СНС имеет низкую помехоустойчивость и зоны их постоянной устойчивой работы не могут охватить все районы работы ЛА на отечественной территории. Чтобы исключить зависимость БПЛА от работы СНС целесообразно иметь на конечных пунктах маршрута (КПМ) пульт управления ЛА аналогичный пульту на начальном пункте маршрута (НПМ). БПЛА, так же как и пилотируемые самолёты и вертолёты, должны выполнять взлет и посадку с необорудованных площадок, полёт при отсутствии наземных средств обеспечения навигации, полёт в условиях неустойчивой работы СНС и других средств радиокоррекции.

Сложность внедрения такого навигационно-пилотажного оборудования заключается в разработке и отладке программно-математического обеспечения (ПМО) – математических формульных зависимостей, алгоритмов и программы бортовой ЦВМ. Это решаемая инженерная задача, которая требует учёта всех условий и особенностей полета транспортного БПЛА. В своё время проводились работы с целью использования отработавших технический ресурс боевых самолётов в беспилотном варианте в качестве мишеней и носителей специальных грузов. Это был скоростной самолёт со взлётом и посадкой с бетонной ВПП. При этом были получены положительные результаты, что подтверждает возможность создания НПК для транспортного БПЛА.

Есть некоторые особенности эксплуатации транспортных БПЛА в условиях Арктики. К ним можно отнести большие расстояния при полном отсутствии дорог, сложность ориентации по магнитному курсу в полярных широтах (вблизи магнитного полюса на широтах выше 70 градусов), отсутствие каких-либо наземных ориентиров, полярная ночь, критические внешние метеоусловия, неустойчивая работа приёмников спутниковой навигационной системы и др.. Но эти вопросы могут успешно решаться в составе навигационно-пилотажного оборудования БПЛА, созданием автонавигатора и автомата пилотирования на основе современной курсовой системы [7],[8]. Для тяжёлых транспортных БПЛА взамен курсовых систем могут применяться инерциальные системы [9], являющиеся автономным датчиком идеального авиагоризонта и курса, с блоком контроля [10], позволяющие обеспечить безопасный полёт и взлёт-посадку в условиях нулевой видимости и действующих внешних возмущений на БПЛА [11],[12]. Реализацию данного предложения по НПК целесообразно начинать с создания автонавигатора и автомата пилотирования на современных пилотируемых ЛА. При положительных результатах это позволит в перспективе заменить второго пилота и штурмана на штатных ЛА.

«Дорогу осилит идущий» - гласит пословица.

Заключение. Созданию современных БПЛА предшествовала много вековая мечта человека к полёту, выраженная в былинах и сказках. История знает ряд легенд о реальных попытках создать летательные устройства и механизмы. В основном, это была непрестанная и упорная борьба энтузиастов-одиночек за свои идеи, вопреки препятствиям, чинимым властями, церковью и общественным мнением. Для учёных это был способ познать окружающий мир и законы природы. Занимаясь исследованиями в своей области, они иногда делали открытия и находили технические решения, которыми пользуются современные учёные и инженеры.

А.Ф. Можайский спроектировал, построил и испытал первый в мире самолёт, способный поднять человека, используя БПЛА в качестве моделей самолёта. При этом в конструкции самолёта заложил конструктивные группы, которые до настоящего времени используются при создании современных самолётов и вертолётот – корпус, крыло, оперение, шасси, управление и силовая установка.

В настоящее время БПЛА имеют, в основном, военное применение – крылатые ракеты, фото- и радиоразведка, оружие для поражения отдельных целей, учебные мишени.

В гражданской тематике БПЛА находят применение в лесном хозяйстве, гидрометеослужбе, геологоразведке, МЧС и др.

В данной статье даётся предложение по обоснованию расширения функций БПЛА – в качестве транспортного средства в интересах промышленности и решения народно-хозяйственных нужд. Особо отмечается необходимость развития транспортных БПЛА в интересах Министерства Обороны в деле защиты северных рубежей.

Создание транспортных БПЛА для отечественной промышленности в настоящее время не представляется сложной задачей, так как нет требований по жизнеобеспечению экипажа, и значительно упрощаются требования по механическим и климатическим воздействиям на БПЛА, что позволяет облегчить массу и увеличить его грузоподъёмность. Что касается лётного и технического обслуживания БПЛА, то оно значительно проще, чем техобслуживание пилотируемого ЛА. Подготовка оператора БПЛА несравнима с длительной и сложной подготовкой пилота и штурмана. На этапе внедрения и в дальнейшем в эксплуатации транспортных БПЛА с НПК значительную помощь в качестве пилотов-операторов могут оказать пилоты, вынужденные уйти с лётной работы по возрасту или состоянию здоровья.

Предлагаемая структура навигационно-пилотажного комплекса транспортного БПЛА и его реализация представляется вполне выполнимой задачей.

Следует отметить, что предлагаемая структура НПК для разработки специальных транспортных БПЛА, может быть применена для создаваемых и уже находящихся на этапе внедрения в эксплуатацию ЛА типа дирижабль, экраноплан, вертоплан и др. в качестве дублирующего контура, а так же для замены второго пилота и штурмана на борту самолётов и вертолётот. Тем более что при отладке такого НПК потребуются проведение лётных испытаний с участием пилотов.

На основании материалов статьи, подтверждающих необходимость использования БПЛА в промышленности в качестве транспортного средства, без которого трудно представить в будущем оперативную доставку широкого «ассортимента» грузов точно по адресу в удаленные места, можно сделать следующий вывод:

В целях контроля экологической обстановки, оказания помощи по решению задач, связанных с наблюдением и контролем за сохранением живой природы, лесных запасов и других природных ресурсов страны, обеспечения безопасности жителей в случае экологических и техногенных катастроф, а также в целях оперативной доставки грузов в удаленные районы РФ в промышленных целях и для обеспечения работ Министерства Обороны по защите северных рубежей, охране природных ресурсов Северного Ледовитого Океана и в целях освоения промышленностью Северного морского пути. И, учитывая современный уровень развития техники, имеющиеся

значительные трудности технического и финансового обеспечения, при выполнении данных работ, считать целесообразным и возможным рекомендовать создание транспортного БПЛА. Технические возможности по разработке таких транспортных БПЛА в отечественной промышленности есть. Целесообразность их создания должны определить заинтересованные организации и министерства.

1. Авиация, энциклопедия, ISBN 5-85270-086-X, н. изд. «БРЭ», ЦАГИ, Москва, 1994г.
2. Корнейчук В.В., Скуднева О.В. и др. Патент РФ № 145174 «Пилотажно-навигационная система транспортного летающего аппарата» G01C 23/00 2006.01 (2014 г.).
3. Скуднева О.В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России. ISSN 0536-1036. ИВУЗ «Лесной журнал» 2014 № 6 стр. 150-154.
4. Корнейчук В.В., Скуднева О.В. и др. Патент РФ № 151304 «Пилотажно-навигационное устройство транспортного летательного аппарата» G01C 23/00 2006.01 (2015 г.)
5. Скуднева О.В. «Структура навигационного – пилотажного комплекса для транспортных летательных аппаратов» Теорія та практика навігаційних приладів систем. Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування-2014. - Вип. 47 (1), стр 21-28.
6. П.Д. Дузь История воздухоплавания и авиации в России. Москва, «Машиностроение», 1981.
7. Патент РФ №2279636 на изобретение «Курсовая система» от 10.07.2006.
8. Корнейчук В.В., Скуднева О.В. Габбасов С.М., Манохин В.И., и др. Патент РФ №2326349 на изобретение «Инерциальная система» от 10.06.2008.
9. Корнейчук В.В., Скуднева О.В., Габбасов С.М., Манохин В.И., Сас П.П., Цепляев Н.А., Цыбизов В.Л. Патент РФ №2597814 на изобретение «Пилотажно-навигационная система транспортного летательного аппарата» от 24.08.2016.
10. Корнейчук В.В., Скуднов И.К., Габбасов С.М., Манохин В.И., и др. Патент РФ №2463560 на изобретение «Навигационный комплекс» от 10.10.2012.
11. Габбасов С.М., Манохин В.И., Корнейчук В.В., Скуднева О.В. и др. Патент РФ №2465555 на изобретение «Навигационный комплекс» от 27.10.2012.

Шалумов А.С., Ильин С.А.

**Автоматизированная подсистема анализа надёжности несущих конструкций элементов, устройств, приборов энергетики при механических воздействиях
«ЭНЕРГОМОДЕЛЬ-НАДЕЖНОСТЬ-НК»**

*ООО «Научно-технический центр «Энергомодель»
(Россия, Москва)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-10

idsp: 000001:spc-12-10-2018-10

Все процессы преобразования энергии при получении потребительской тепловой и электрической энергии должны сопровождаться аппаратурой контроля и управления процессов. К надёжности такой аппаратуры предъявляются особые требования. Это обусловлено тем, что отказы такой аппаратуры на энергетических комплексах мощностью 100 и более МВт могут привести к необратимым процессам и катастрофам.

Объекты энергетики – элементы, устройства, приборы энергетики (ЭУПЭ) такие как ветрогенераторы, шкафы с электротехническим оборудованием, солнечные батареи и др, в процессе эксплуатации подвергаются механическим, тепловым и электромагнитным воздействиям. Для сокращения сроков и затрат на проектирование применяются специализированные САПР, задача которых на ранних этапах проектирования – анализ стойкости ЭУПЭ к указанным внешним воздействующим факторам и оценка надёжности данных объектов. На сегодняшний день при расчёте надёжности ЭУПЭ не учитывается влияние механических факторов на проектируемый объект, в то время как значительное количество аварий связано с выходом из строя несущих конструкций ЭУПЭ при механических перегрузках и количество таких отказов составляет порядка 50 %. Кроме того влияние механических факторов на 30 % сокращает срок службы объекта.

В настоящее время для обеспечения высокой надёжности ЭУПЭ во время проектирования её макетируют и подвергают длительным разнородным дорогостоящим испытаниям. При испытаниях трудно точно воспроизвести

комплексность (одновременность) физически разнородных воздействий и оценить надёжность и долговечность несущей конструкции ЭУПЭ. Распространённые на предприятиях России импортные программы для инженерного анализа (ANSYS, COSMOS, Nastran, COMSOL и др.) позволяют решать отдельные задачи моделирования физических процессов для машиностроительных конструкций, но в них отсутствует:

1. Расчет надёжности несущей конструкции ЭУПЭ.
2. Учет специфики электроники, применяемой в энергетике (силовая электроника).
3. Базы данных электронных компонентов.

Альтернативы разрабатываемой технологии цикла моделирования объектов энергетики от конструкции до электронного компонента на внешние воздействия и оценки надёжности с учетом результатов, полученных при воздействии тепловых и механических факторов, на российском и зарубежном рынке отсутствуют. Поэтому в данном проекте была поставлена задача разработки отсутствующих в настоящее время технологии и программного обеспечения анализа надёжности ЭУПЭ с учётом механических факторов на основе комплексного моделирования физических процессов в современных ЭУПЭ на внешние механические и тепловые воздействия. Результатом выполнения данного проекта станет использование созданной автоматизированной подсистемы анализа надёжности несущих конструкций ЭУПЭ «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ-НАДЕЖНОСТЬ-НК» в составе любой САЕ-системы для перехода на принципиально новый уровень информационных технологий проектирования ЭУПЭ в России, что позволит расширить номенклатуру выпускаемой высоконадёжной, а, следовательно, конкурентоспособной экспортно-ориентированной продукции, снизить брак и затраты на проектирование и производство, сократить сроки выхода на внешний рынок новых изделий.

Прямых конкурирующих решений нет. Вышеперечисленные системы позволяют решать отдельные задачи моделирования физических процессов для машиностроительных конструкций, но не учитывают расчет надёжности несущих конструкций ЭУПЭ, специфику ЭУПЭ, не содержат баз данных электронных компонентов.

Программными продуктами, предназначенными для расчета надёжности, являются: ПК-Relex, АСОНИКА-К, АСОНИКА-Б, АСРН, Risk Spectrum.

Сходства:

Рассчитывают показатели надёжности.

Отличия:

В ПК-Relex, АСОНИКА-К, АСОНИКА-Б, АСРН, Risk Spectrum отсутствует, а в составе автоматизированной системы комплексного моделирования процессов в энергетике и приборостроении на внешние тепловые, механические, электромагнитные воздействия «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ» присутствуют [1, 2]:

1. Учет специфики ЭУПЭ в модели физических (тепловых, механических и др.) процессов, протекающих в силовой электронике.
2. База данных материалов и электронных компонентов по геометрическим, теплофизическим, физико-механическим, усталостным, электрическим и надёжностным параметрам, учитывающая специфику ЭУПЭ и содержащая допустимые значения характеристик, необходимые для принятия решения.
3. Учет особенностей свойств материалов, применяемых в энергетике, например, нелинейности демпфирующих, теплопроводящих и других свойств современных материалов.
4. Прогнозирование усталостных разрушений и надёжности ЭУПЭ с учетом всего комплекса физических воздействий среды.
5. Простые и интуитивно понятные интеллектуальные графические интерфейсы, состыкованные с базой данных материалов и электронных компонентов, удобные для работы исследователям и проектировщикам новых объектов ЭУПЭ.
6. Программы, позволяющие ускоренно проводить моделирование сложных конструкций ЭУПЭ, осуществляя автоматические разбиение и построение сетки, а также склеивание моделей в местах стыковки деталей с разными шагами сетки.

7. Модуль интеграции с системами проектирования Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD в формате IDF.

8. Программы идентификации неизвестных параметров материалов.

В результате реализации в проекте автоматизированной подсистемы анализа надежности несущих конструкций ЭУПЭ при механических воздействиях будут созданы:

1. Программная реализация расчета надежности несущих конструкций ЭУПЭ в подсистеме «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ-НАДЕЖНОСТЬ-НК».

2. Программная реализация совместимости с распространёнными CAD-системами за счёт учёта специфики высоконадёжных ЭУПЭ при создании новых графических интерфейсов и стыковки со специализированной базой данных материалов и электронных компонентов. Разработка дополнительного модуля интеграции с системами создания 3-D моделей ЭУПЭ ProEngineer, SolidWorks, Inventor в форматах IGES и STEP.

В результате реализации проекта будут получены:

1. Сокращение на 40-45% времени разработки высоконадёжных ЭУПЭ за счет программной реализации:

- модульности (иерархического подхода) при моделировании: шкаф - блок – печатный узел – электронный компонент, позволяющего значительно сократить размерность модели и, тем самым, объем требуемой памяти и время расчета;
- модуля интеграции (интерфейса и конвертора) с системами создания 3-D моделей МЭА ProEngineer, SolidWorks, Inventor в форматах IGES и STEP и со специализированной базой данных материалов и электронных компонентов.

2. Повышение точности анализа надежности на основе их моделирования на внешние тепловые и механические воздействия в 2 - 4 раза и конкурентоспособности нового программного обеспечения (ПО), позволяющего выявлять и обходить потенциальные дефекты в надежности несущих конструкций еще на этапе моделирования, за счет:

1) разработки алгоритма расчёта надёжности несущих конструкций ЭУПЭ с учётом механических воздействий;

2) разработки программного модуля, предназначенного для анализа надёжности несущих конструкций ЭУПЭ при механических воздействиях.

3. Обеспечение стоимости ПО в 8 - 10 раз ниже по сравнению с импортными аналогами и в 2-6 раз ниже по сравнению с российскими аналогами.

Основными покупателями и нашими потенциальными потребителями за рубежом и в России являются научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, научно-производственные объединения, заводы и различные информационно-научные центры, занятые проектированием и производством ЭУПЭ.

Созданная в данном проекте автоматизированная система комплексного моделирования процессов в энергетике и приборостроении на внешние тепловые, механические, электромагнитные воздействия «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ» позволит реализовать электронную модель ЭУПЭ.

1. Шалумов А.С., Шалумов М.А., Ильин С.А. Автоматизация расчета надёжности элементов, устройств, приборов энергетики при механических воздействиях / Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (Челябинск, 8 сентября 2017 г.). – Стерлитамак: АМИ, 2017. - С.43 - 48.
2. Шалумов А.С., Шалумов М.А., Ильин С.А. Автоматизированная подсистема анализа и обеспечения стойкости элементов, устройств, приборов для энергетики к механическим воздействиям «ЭНЕРГОМОДЕЛЬ-М» / Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции «Современный взгляд на проблемы технических наук» (Уфа, 11 сентября 2017 г.). № 4. – Уфа, 2017. - С.30 - 34.

Шуленин С.С., Рязанцев А.Е.

Пути снижения горючести полимерных материалов

*Территориальный отдел надзорной деятельности и профилактической работы
№4 управления надзорной деятельности и профилактической работы Главного
управления МЧС России по Алтайскому краю
(Россия, Рубцовск)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-11

ids: 000001:spc-12-10-2018-11

Полимерные материалы все шире используются в разных областях народного хозяйства, в том числе в строительстве. Будучи органическими по своей природе, полимерные материалы представляют высокий потенциал для возникновения и распространения пожара, а также проявления опасных факторов пожара, приводящих к гибели людей и материальному ущербу.

В свою очередь, горючесть – это комплексная характеристика материала или конструкции. Она включает следующие величины:

1. температуру воспламенения или самовоспламенения;
2. скорости выгорания и распространения пламени по поверхности;
3. предельные параметры, характеризующие условия, при которых возможен самоподдерживающийся процесс горения, например состав атмосферы (кислородный индекс) или температура (температурный индекс).

Горение полимерных материалов, являющееся доминирующим процессом подавляющего большинства современных пожаров, представляет собой сложное явление, включающее в себя элементы тепло- и массообмена, газовой динамики, химической кинетики реакций в конденсированной и газовой фазах, а так же на границе их раздела, масштабные и другие факторы. Большое разнообразие полимерных материалов по химическому строению и составу, их многокомпонентность, сочетание с другими материалами при конструировании изделий или конкретном конечном целевом использовании, многообразие физических форм при одном и том же составе предопределяют специфику возникновения, развития и последствий пожаров с участием полимерных материалов.

Научно-обоснованное комплексное определение основных характеристик пожарной опасности полимерных материалов, нормирование их пожаробезопасного применения для конкретных целей, прогнозирование поведения в реальных пожарных ситуациях - важные научные и прикладные аспекты общей актуальной проблемы пожарной безопасности различных объектов. [1]

Все методы снижения горючести основаны на следующих принципах:

1. изменение теплового баланса пламени за счет увеличения различного рода теплопотерь;
2. снижение потока тепла от пламени на полимер за счет создания защитных слоев, например из образующегося кокса;
3. уменьшение скорости газификации полимера;
4. изменение соотношения горючих и негорючих продуктов разложения материала в пользу негорючих.

Наиболее простой способ изменения теплового баланса, увеличения потерь тепла – приклеивание полимера к поверхности теплопроводящего, например металлического, изделия. Если само изделие достаточно массивно, а толщина полимера не слишком велика, то горючесть конструкции может быть значительно ниже, чем самого полимера. Чем тоньше слой полимера, тем больше потери тепла через полимер в подложку и тем в более жестких условиях может происходить самостоятельное горение. [2]

Введение в полимер инертных наполнителей – еще один из способов снижения горючести полимерного материала. Под инертными наполнителями понимают такие, которые не оказывают существенного влияния на состав и количество продуктов пиролиза полимеров в газовой фазе и величину коксового остатка в условиях горения. Их можно разделить на две группы:

1. минеральные наполнители, устойчивые до температуры 1000°C – оксиды металлов, фториды кальция и лития, силикаты, технический углерод, неорганическое стекло, порошкообразные металлы и т.п.;
2. вещества, разлагающиеся при температурах ниже 400 – 500°C с поглощением тепла и обычно с выделением углекислого газа и/или паров воды, аммиака – гидроксиды, карбонаты, гидрокарбонаты металлов, аммонийфосфаты и т.д. [2]

Важным обстоятельством, влияющим на все стадии горения полимеров, является образование кокса при воздействии пламени на полимер. Первое важное следствие образования кокса – это снижение выхода горючих продуктов в газовую фазу, уменьшение потока горючих газов к пламени. Действительно, углерод, остающийся в твердой фазе, мог бы попасть в пламя и окислиться до CO_2 с большим тепловым эффектом. Конечно, в большом пожаре этим все дело и кончится, и никакой пользы от образования кокса мы не получим. Но еще раз заметим, что в данном случае нас интересуют слабые источники зажигания, поэтому эффект от образования кокса так важен.

Таким образом, еще один из способов снижения горючести полимерных материалов – воздействие на направление деструкции полимера в сторону увеличения количества кокса [3]. Неправильно было бы предполагать, что весь эффект при образовании кокса сводится лишь к снижению выхода топлива. Образование коксовой шапки на поверхности полимера между пламенем и пиролизующимся материалом экранирует последний от теплового потока, изменяет тепловой баланс в сторону увеличения теплопотерь, например, теплопотерь излучением от поверхности кокса, которая оказывается нагретой до значительно больших температур, чем поверхность полимера, или конвективных теплопотерь и т.д.

Пожары приносят огромный вред (материальный, психологический и т.п.). в результате гибнут десятки тысяч людей. Именно поэтому, во всем мире, озадачены поиском путей ограничивающих горючесть полимеров и уменьшающих выделение дыма и токсичных продуктов при горении. Необходимость исследований в данном направлении очень актуальна на многие годы вперед.

1. Баратов А.Н., Андрианов Р.А., Корольченко А.Я., Михайлов Д.С., Ушков В.А., Филин Л.Г. Пожарная опасность строительных материалов. М.: Стройиздат, 1988.
2. Кропотова Н. А. Пути снижения горючести полимерных материалов используемых для электроизоляции <https://novainfo.ru/article/7964>
3. Кропотова, Н.А. Совершенствования огнестойкости электроизоляционных полимерных материалов. / Н.А. Кропотова, В.Н. Трубехин. // Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции «Новая наука: от идеи к результату» (29 июня 2016 г, г. Сургут). / в 2 ч. Ч.2 - Стерлитамак: АМИ, 2016. – С. 225-227.
4. Серков Б.Б. Пожарная опасность полимерных материалов, снижение горючести и нормирование их пожаробезопасного применения в строительстве : Дис. тех. наук. ВАК: 05.26.03 Специальность: Пожарная и промышленная безопасность– М., 2001: - 271 с.

РАЗДЕЛ II. ФИЗИКА

Шляхтенко П.Г.

Ошибки, допускаемые при расчетах электромагнитных полей в основных учебниках курса общей физики

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна профессор
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-12

idsp: 000001:spc-12-10-2018-12

Аннотация

На примере решения двух задач с помощью интегральных уравнений Максвелла рассмотрены методические ошибки, присутствующие при решении этих и подобных задач в основных университетских учебниках в курсе общей физики. Показано, что в случае решения задачи на нахождение магнитного поля бесконечного соленоида вне соленоида эти ошибки приводят к неправильному результату, который вот уже более 40 лет переписывается из учебника в учебник.

Ключевые слова: соображения симметрии, магнитное поле соленоида, интегральные уравнения Максвелла.

Abstract

Using the example of solving two problems with the help of the Mac-Swell integral equations, methodological errors that are present when solving these and similar problems in the main university textbooks on general physics are considered. It is shown that in the case of solving the problem of finding the magnetic field of an infinite solenoid outside the solenoid, these errors lead to an incorrect result, which has been rewritten from a textbook to a textbook for more than 40 years.

Keywords: symmetry considerations, magnetic field, solenoid, Maxwell integral equations.

Введение

Многие серьезные математики не любят читать научные трактаты, если там мало формул из-за "неоднозначности слов".

Гениальный экспериментатор Майкл Фарадей получил в детстве только начальное образование. Поэтому свои многочисленные эксперименты по электричеству и магнетизму он описал в двух очень толстых томах "Трактата об электричестве" на прекрасном английском языке, стараясь писать так, чтобы написанное им было правильно и одинаково понято любым заинтересованным читателем. Для этого ему потребовалось очень много слов.

Молодой математик Джеймс Кларк Максвелл внимательно прочел труд Фарадея и поставил перед собой задачу "перевести все основные закономерности, установленные и описанные Фарадеем, с английского языка на язык математики". В результате он получил четыре коротких уравнения в интегральной форме, а позднее и в дифференциальной форме, обессмертившие его имя, которые вместе с "силой Лоренца" решают в принципе любую задачу классической электродинамики и оптики.

Применяя эти уравнения для однородной изотропной среды с постоянными значениями электромагнитных констант, Максвелл показал, что свет это электромагнитная волна, и вывел знаменитую "формулу Максвелла", связывающую эти константы со скоростью света в данной среде.

Уже много позднее, после создания специальной теории относительности А. Пуанкаре и А. Эйнштейном, оказалось, что уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца, т.е. имеют одинаковый вид в любой инерциальной системе, движущейся относительно рассматриваемых явлений с любой скоростью, вплоть до скорости света в вакууме. О чем ни Фарадей, ни Максвелл не имели никакого представления.

"Когда решаешь задачи с помощью этих уравнений, то создается ощущение, что они гораздо умнее нас"...

Поэтому хорошему усвоению лекционного материала, связанного с уравнениями Максвелла, в курсе общей физики уделяется повышенное внимание.

Такое усвоение в условиях спорного постсоветского "реформирования" (сокращения учебных часов при сохранении содержания учебных программ курса общей физики) вынужденно достигается (если достигается) путем решения ограниченного круга симметричных задач, в основном с помощью уравнений Максвелла в интегральной форме.

К сожалению, более чем 35- летний опыт преподавания курса общей физики убедил автора в том, что опубликованная в рекомендуемых учебниках методика решения примерных задач на нахождение напряженности электростатического поля из-за существующих методических ошибок в тексте не может быть понята при самостоятельном чтении даже сильными студентами.

Это проявляется в том, что, пытаясь честно усвоить прочитанное по учебнику, сильные студенты, а иногда и преподаватели, не могут даже подступиться к решению других подобных задач без активной помощи квалифицированных профессоров, если они еще рядом сохранились.

Более того, отсутствие общего методически правильного и понятного подхода, приводит к неверному решению задачи нахождения магнитного поля бесконечного соленоида вне соленоида, которое транслируется из учебника в учебник, как у нас в стране, так и за рубежом, вот уже более 40 лет.

Цель исследования

Ниже, на примерах решения двух задач, методически корректного с точки зрения автора, будут показаны ошибки и неточности, связанные с традиционным изложением этих решений в рекомендованных Министерством образования источниках.

Результаты и их обсуждение

1. Вычисление напряженности электрического поля, создаваемого равномерно заряженным шаром радиусом R с объемной плотностью ρ

Для решения этой задачи с помощью интегральных уравнений Максвелла нужно использовать следующее уравнение, которое непосредственно следует из теоремы Гаусса после замены полного заряда внутри замкнутой поверхности s соответствующим интегралом

$$\oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV \quad (1)$$

где: E_n – проекция вектора напряженности электрического поля на направление нормали (единичного вектора $\vec{n}$, направленного всегда наружу замкнутой поверхности S) к бесконечно малому участку dS этой поверхности; V – объем внутри поверхности S ; dV – бесконечно малый объем, выделенный непосредственно вблизи точки, в которой объемная плотность заряда $\rho = dq/dV$; ε_0 – константа, связанная с системой СИ,

Именно в этом уравнении присутствует проекция искомого вектора E_n (слева) и известная величина ρ (справа).

Уравнение (1) справедливо для любой замкнутой поверхности S . Поэтому при решении задачи мы вправе выбирать эту поверхность таким образом, чтобы из левого интеграла можно было вынести E_n . Очевидно это можно делать только тогда, когда $E_n = \text{const}$.

Поэтому, прежде чем выбрать вид замкнутой поверхности интегрирования, необходимо установить картину электростатического поля, создаваемого заданной системой зарядов в решаемой задаче. Точнее, из каких-то дополнительных соображений определить ход силовых линий вектора $\mathbf{E}$ во всем рассматриваемом пространстве. При этом устанавливать направление силовой линии не нужно.

Для ряда симметричных распределений заряда (сферическое, цилиндрическое, равномерно заряженная плоскость) "это можно легко сделать, используя соображения симметрии", как написано во всех существующих учебниках. Эти же "соображения симметрии" рекомендуется использовать при выборе вида поверхности интегрирования S . К сожалению, что такое "соображения симметрии" в учебниках ничего не написано. Конечно, большой опыт, интуиция и большой объем остаточных знаний могут помочь преподавателю решить эти проблемы с помощью "соображений симметрии" лосobenно не задумываясь о том, что это такое.

Но как быть студенту, "грызущему гранит науки молодыми зубами"?

Автор считает, что под "использованием соображений симметрии" в данном контексте следует понимать следующие действия:

1. поиск геометрического места точек в исследуемом пространстве, которые принципиально неразличимы,
2. использование для этих точек "принципа причинности", т.е. утверждения, что одинаковые причины должны приводить к одинаковым следствиям. Последнее неизбежно приводит к заключению, что раз эти точки неразличимы, то все параметры искомого силового поля в этих точках должны быть одинаковы (иначе их можно было бы отличить по этим параметрам).

Проиллюстрируем это на примере решения обсуждаемой задачи.

На рис. 1 сплошной жирной линией изображен однородно заряженный шар радиусом R .

Представляется очевидным, что в отсутствие посторонних силовых полей, кроме электростатического поля равномерно заряженного ($\rho = \text{const}$) шара, все точки, лежащие на поверхности шара, в принципе неразличимы. Следовательно, величина и направление вектора $\mathbf{E}$ во всех точках его поверхности также должны быть одинаковы, а следовательно и направлены под одним углом α к вектору нормали к поверхности n . При этом нет никаких видимых предпочтений для величины и знака этого угла (α или $-\alpha$).

Рис. 1. Равномерно заряженный шар радиусом R

Принимая во внимание, что силовые линии электростатического поля начинаются и кончаются на разноименных зарядах, и вектор $\mathbf{E}$ в каждой точке этой поверхности может быть направлен единственно возможным образом по отношению к поверхности, следует, что $\alpha = 0$, а следовательно, он направлен в рассматриваемых точках перпендикулярно поверхности шара. То же самое можно сказать о точках любой сферической поверхности, концентрической с поверхностью шара радиусом $r > 0$.

К подобному выводу можно прийти и математическим путем.

Действительно, раз все точки, лежащие на поверхности любой концентрической сфере в нашей задаче неразличимы, то и потенциал электрического поля во всех этих точках должен быть одинаковым ($\varphi = \text{const}$). Используя связь между вектором $\mathbf{E}$ и φ ($\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$), легко получить [1-3], что проекция вектора напряженности электрического поля на любое направление, касательное к этой поверхности, $E_t = 0$. А следовательно, вектор $\mathbf{E}$ всегда перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности.

Поэтому, если мы выберем замкнутую поверхность S в формуле (1) в виде такой сферической поверхности, то очевидно, что в любой точке этой поверхности $E_n = \text{const}$ (все точки этой поверхности неразличимы, т.к. находятся на одном расстоянии от центра, а следовательно все характеристики электрического поля в этих точках должны быть одинаковы).

Из рис. 1 видно, что все пространство поверхностью шара естественно разбивается на два подпространства, когда $R \geq r > 0$ и когда $r > R$.

В первом случае мы можем найти E_n внутри шара. Во втором – снаружи.

В первом случае из (1) для поверхности S_1 следует

$$\oint_{S_1} E_n dS = E_n \oint_{S_1} dS = E_n 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \int_V dV = \frac{\rho}{3} 4\pi r^3. \quad (2)$$

Решая (2) относительно E_n , получим

$$E_n = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0} \quad (3)$$

Из (3) видно, что при $\rho > 0$, $E_n > 0$. Т.е. вектор $\mathbf{E}$ во всех точках поверхности S_1 направлен туда же, куда и вектор нормали $\mathbf{n}$, т.е. наружу поверхности S_1 . Если $\rho < 0$, то $E_n < 0$, т.е. вектор $\mathbf{E}$ во всех точках поверхности S_1 направлен в сторону, противоположную вектору нормали $\mathbf{n}$. Векторная форма записи формулы (3)

$$\vec{E} = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0} \vec{n}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что величина E в центре шара ($r = 0$) равна нулю. Это противоречит широко распространенному школьному взгляду - "чем гуще идут силовые линии, тем больше величина напряженности электрического поля". В случае точечного заряда это правильно, но наш пример показывает, что в общем случае распределенного заряда такое утверждение совершенно не соответствует действительности.

Понятие силовых линий ввел Фарадей. Они помогали ему лучше понимать электрическое поле точечных зарядов. На самом деле это всего лишь полезная абстракция, помогающая строить направление силового вектора в каждой точке линии, направленного по касательной к ней. И ничего более.

Во втором случае, в качестве поверхности интегрирования в (1) выбираем поверхность S_2 (рис. 1). Аналогично решая уравнение (1) и принимая во внимание, что заряд расположен только в объеме шара радиусом R , получим:

$$\oint_{S_2} E_n dS = E_n \oint_{S_2} dS = E_n 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \int_V dV = \frac{\rho}{\varepsilon_0 3} 4\pi R^3. \quad (5)$$

Решая (5) относительно E_n , получим для электрического поля вне шара

$$E_n = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2} . \quad (6)$$

Из (6) видно, что при $\rho > 0$, $E_n > 0$. Т.е. вектор $\mathbf{E}$ во всех точках поверхности S_2 направлен туда же куда и вектор нормали $\mathbf{n}$, т.е. наружу поверхности.

Если $\rho < 0$, то $E_n < 0$, т.е. вектор $\mathbf{E}$ во всех точках поверхности S_2 направлен в сторону, противоположную вектору нормали $\mathbf{n}$, т.е. можно записать для этого случая в векторной форме:

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2} \vec{\mathbf{n}} . \quad (7)$$

Из (7) видно, что поле равномерно заряженного шара вне шара совпадает с полем точечного заряда, равного заряду шара, помещенного в центр шара.

При выводе формул аналогичных (3) и (6) в [1, 2] сделана методическая ошибка. Вместо проекции E_n , которая может быть и положительной и отрицательной, за знак интеграла выносятся величина вектора E . Поэтому, вместо (3) и (6) в [1, 2] записано, соответственно,

$$E = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0} \quad \text{и} \quad E = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2} . \quad (8)$$

что в общем случае неверно, т.к. при $\rho < 0$ получается, что положительная величина вектора E меньше нуля.

2. Вычисление магнитного поля бесконечного соленоида с током I

В хорошо известных университетских учебниках курса общей физики, широко использующихся при чтении курса физики в разделе "Электричество и магнетизм" для студентов физических специальностей, например [1,2,3], утверждается, что магнитное поле бесконечного соленоида с током I вне соленоида равно нулю.

На рис. 2 показан участок бесконечного соленоида с током в этом случае, использованный для доказательства этого утверждения в [1,2].

Рис. 2 (из [1])

Авторы рассматривают циркуляцию вектора B по контуру $CC'D'D$ и приходят к выводу, что величина $B=0$ вне соленоида. Этот вывод действительно правомочен, если верно предположение авторов о том, что предполагаемое направление этого вектора параллельно и противоположно направлению вектора B внутри соленоида. Однако это предположение нуждается в доказательстве, которое в [1,2] не приводится.

Автор [3] пытается доказать, рассматривая соленоид, в котором направление тока в каждом витке строго перпендикулярно оси соленоида, т.е. не учитывается спиральный характер протекания тока в обмотке реального соленоида.

В этом случае (рис. 3) любой выделенный элемент dl с током I даст в рассматриваемой точке результирующий вектор dB , проекция которого dB_l на направление окружности в рассматриваемой точке, проведенной радиусом r_0 , равным расстоянию от точки до оси спирали, уже не равна нулю, и это нужно учитывать при суммировании.

Рис. 3. Вектор dB , создаваемый элементом dl спирали с током I

Ниже автор постарается корректно решить эту задачу с помощью соответствующего интегрального уравнения Максвелла, не делая дополнительных предположений.

Рассматривается бесконечный соленоид с током I , имеющий плотную намотку проводом прямоугольного сечения.

Будем исходить из "соображений симметрии", под которыми автор понимает то, что уже обсуждалось при решении первой задачи. Кроме этого будем учитывать факт отсутствия у магнитного поля источников поля, что отражается в замкнутости силовых линий вектора B .

Применяя эти соображения к нашей задаче, и учитывая тот факт, что ток в соленоиде движется по спирали, можно сделать вывод, о том, что в общем случае, силовая линия вектора B как внутри соленоида, так и вне его может иметь форму цилиндрической спирали, симметричной относительно оси симметрии соленоида (принцип причинности этого не запрещает), причем все точки этой спирали в рамках рассматриваемой задачи неразличимы. В этом случае не возникает вопрос о необходимости замкнуть эту линию, т.к. соленоид бесконечен и "краев", на которых этот вопрос был бы актуален, не имеет. Конечно, возможны, и по тем же

соображениям, частные случаи спирали – окружность, расположенная в плоскости перпендикулярной оси соленоида (шаг винта равен нулю), и прямая, параллельная оси симметрии (шаг винта бесконечно большой).

Необходимое нам для решения задачи уравнение Максвелла, содержащее проекцию вектора индукции магнитного поля на направление dl контура l (B_l), в случае постоянного тока ($\partial \vec{E}/\partial t = 0$) имеет вид:

$$\oint_l B_l dl = \mu_0 \int_S j_n dS = \mu_0 I_{\text{охв}}, \quad (9)$$

где l – контур (любая замкнутая линия); S – любая поверхность, опирающаяся на этот контур (все точки контура принадлежат этой поверхности); $\vec{j}$ – вектор плотности тока ($j_n = dl/ds$); $I_{\text{охв}}$ – суммарный ток, охватываемый контуром l (протекающий через поверхность S); μ_0 – константа, связанная с системой СИ.

Очевидно, что B_l из (9) можно найти, если выбрать контур l таким образом, чтобы $B_l = \text{const}$.

Выберем в качестве контура интегрирования прямоугольный контур l_1 , изображенный на рис. 4-а.

Рис. 4. Корректный расчет поля соленоида
(рис. 4-б - вид слева на рис. 4-а)

В этом случае, при корректном рассмотрении циркуляции вектора $\vec{B}$ по контуру l_1 , сторона которого 3,4 удалена на бесконечность, из уравнения (9) следует, что

$$\oint_{l_1} B_l dl = \int_1^2 B_l dl + \int_2^3 B_l dl + \int_3^4 B_l dl + \int_4^1 B_l dl = \mu_0 I_{\text{охв}} = 0 \quad (I_{\text{охв}} = 0), \quad (10)$$

где B_l – проекция вектора B на направление dl ; $I_{\text{охв}}$ – суммарный ток, охватываемый контуром l_1 .

На бесконечности (на участке 3-4) поле соленоида, очевидно, должно совпадать с полем прямого тока, которое, как известно [1-3], обратно пропорционально расстоянию до тока, т.е. $B = 0$ на этом участке, а следовательно, и интеграл на этом участке равен нулю.

На участках 2-3 и 4-1 касательная к спирали в любой точке перпендикулярна к dl . Следовательно, $B_l = 0$, и интегралы на этих участках тоже равны нулю. Из симметрии задачи следует, что на участке 1-2 все точки неразличимы, а следовательно $B_l = \text{const}$, которую можно вынести за знак интеграла.

Следовательно, и $B_l = 0$, т.е. проекция вектора $\mathbf{B}$ на направление $l_{1,2}$ равна нулю, а не величина вектора $\mathbf{B}$, как утверждается в [1-3].

Остается проверить, не является ли силовая линия вектора $\mathbf{B}$ окружностью, проведенной вокруг оси симметрии соленоида, что никак не противоречит "соображениям симметрии", т.к. очевидно, что все точки на этой окружности неразличимы, а следовательно и проекция вектора B_l во всех точках контура l_2 на рис. 4-б, выбранного в виде такой окружности будет величиной постоянной. Поэтому, применяя уравнение Максвелла для этого контура [4], получим:

$$\oint_{l_2} B_l dl = B_l \oint_{l_1} dl = B_l 2\pi r = \mu_0 I_{\text{охв}} = \mu_0 I. \quad (11)$$

Откуда следует, что

$$B_l = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (12)$$

В соответствии с правилом выбора знака тока I , его величина в (11) берется со знаком «+», если направление протекания тока совпадает с направлением нормали к поверхности, натянутой на контур l_2 . Направление же нормали (орт $\vec{n}$) определяется направлением движения правого винта, который нужно вращать по направлению выбранного направления обхода контура.

В нашем случае (рис. 4-б), выбранное направление обхода контура дает указанное на рисунке направление единичного вектора нормали $\vec{n}$, совпадающее, как видно из рисунка с направлением тока I , протекающего через поверхность, натянутую на контур l_2 , т.е.

$$B_l > 0; \Rightarrow B_l = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (13)$$

и следовательно, вектор $\mathbf{B}$ направлен вне соленоида так, как указано на рис. 4-б.

При корректном рассмотрении поля соленоида внутри соленоида в этой же задаче, необходимо также априори учесть, что возможным видом силовой линии вектора $\mathbf{B}$ внутри соленоида также является аналогичная винтовая линия, проходящая внутри соленоида. Поэтому, применяя уравнение (9) для контура l_3 (Рис. 4-а), с учетом вывода (10) получим:

$$\begin{aligned} \oint_{l_3} B_l dl &= \int_{1'}^{2'} B_l dl + \int_{2'}^{3'} B_l dl + \int_{3'}^{4'} B_l dl + \int_{4'}^{1'} B_l dl = \int_{1'}^{2'} B_l dl = \\ &= B_l l_{1'2'} = \mu_0 I_{\text{охв}} = \mu_0 n l_{1'2'} I, \end{aligned} \quad (14)$$

где n – число витков на единицу длины соленоида ($n = N_{1'2'} / l_{1'2'}$)

Решая (13) относительно B_l , получим, что на участке $l_{1'2'}$

$$B_l = \mu_0 n I. \quad (15)$$

Аналогично, применив (9) для контура l_4 (Рис. 4-б), получим, что для этого контура $B_l = 0$.

После чего, применяя правило знаков для охватываемых контуром l_3 токов, получим окончательно правильный ответ для величины вектора $\mathbf{B}$ внутри соленоида

$$\mathbf{B} = \mu_0 n I. \quad (16)$$

Основные выводы

1. Используемые при решении симметричных задач для установления картины электрического поля и магнитного поля т.н. "соображения симметрии" являются отражением известного принципа причинности, а именно одинаковые причины должны

приводить к одинаковым следствиям. Этот принцип применяется для нахождения геометрического места неразличимых точек, в которых все параметры искомого поля должны быть тождественны.

2. С использованием уравнений Максвелла в интегральной форме получено корректное решение двух хорошо известных симметричных задач. Показано, что во избежание методических и фактических ошибок нельзя подменять проекцию вектора его значением, т.к. проекция может иметь знак, а значение вектора всегда положительно. Кроме этого, равенство нулю проекции вектора вовсе не означает равенство нулю вектора. Именно такая подмена привела к неверному ответу при нахождении индукции магнитного поля соленоида вне соленоида, которое транслируется вот уже более 40 лет из учебника в учебник.

3. Показано, что магнитное поле прямого бесконечного соленоида вне соленоида в указанных приближениях не равно нулю, но совпадает с полем прямого бесконечного проводника с током.

1. Э. Парселл. Берклеевский курс физики Электричество и магнетизм: М., «Наука» - 1975 - С. 210-211.
2. Савельев И.В. Курс общей физики т.2. Электричество и магнетизм: М., «Наука» - 1982 - С. 149 - 151.
3. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Электричество: М., «Наука» - 1983 - С. 236-237.
4. Шляхтенко П.Г. Методические ошибки, допускаемые при расчете электрического и магнитного полей с помощью интегральных уравнений Максвелла // Альманах современной науки и образования. 2011.- Т. 8, №2(45). - С. 129-135.

РАЗДЕЛ III. МАТЕМАТИКА

Кадиев Р.И., Поносов А.В.

Стохастическая устойчивость и допустимые пары пространств

ДНЦ РАН

(Россия, Махачкала)

doi:10.18411/spc-12-10-2018-13

idsp: 000001:spc-12-10-2018-13

Введение

Пусть $(\Omega, F, (F_t)_{t \geq 0}, \mathbf{P})$ - полное вероятностное пространство с фильтрацией, $Z := (z^1, \dots, z^m)^T$ - m -мерный семимартингал на нём (см., например, [1]).

В дальнейшем используются следующие линейные пространства случайных процессов:

- $L^n(Z)$ состоит из $n \times m$ -матричных предсказуемых случайных процессов, заданных на $[0, \infty)$, чьи строки являются локально интегрируемыми по семимартингалу Z : см., например, [1];

- k^n состоит из n -мерных F_0 -измеримых случайных величин (обозначение: $k = k^1$);

- D^n состоит из n -мерных случайных процессов на $[0, \infty)$, которые могут быть представлены в виде: $x(t) = x(0) + \int_0^t H(s) dZ(s)$ ($t \geq 0$), где $x(0) \in k^n$, $H \in L^n(Z)$.

Можно показать, что существует естественный топологический изоморфизм $D^n \cong L^n(Z) \times k^n$, который аналогичен соответствующему детерминированному изоморфизму, связывающему пространства Лебега с пространствами абсолютно непрерывных функций. Этот изоморфизм и его обобщения играют центральную роль в общей теории функционально-дифференциальных уравнений (см., например, [16]). Поэтому, мы можем назвать описанные выше пространства случайных процессов соответственно "пространство решений", "пространство (абстрактных) производных" и "пространство начальных данных".

Здесь и в дальнейшем мы используем обозначение $\mathbf{E}$ для математического ожидания по отношению к заданной вероятностной мере $\mathbf{P}$.

Главным объектом статьи является следующее уравнение:

$$dx(t) = (Vx(t) + f(t))dZ(t), \quad t > 0, \quad (1)$$

где V - k -линейный вольтерров оператор, т. е. оператор, зависящий от "прошлого", который определён на некоторых пространствах случайных процессов.

Напомним, (см., например, [2]), что стохастический оператор V называется:

- k -линейным, если $V(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) = \alpha_1 Vx_1 + \alpha_2 Vx_2$ для любых ограниченных, F_0 -измеримых, скалярных α_1, α_2 и любых x_1, x_2 из области определения оператора V ;
- вольтерровым, если для любого момента остановки [1] $\tau = \tau(\omega) \in [0, \infty)$ п. н. и любых x_1, x_2 из области определения оператора V , из равенства $x_1(t) = x_2(t)$, $t \in [0, \tau]$ п. н. следует, что $(Vx_1)(t) = (Vx_2)(t)$, $t \in [0, \tau]$ п. н.

Асимптотические свойства уравнения (1) (в основном, его частных случаев) изучались многими авторами: см., например, [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], а также многочисленные ссылки, приведённые в этих работах.

Изучение связей между устойчивостью и допустимостью пар пространств для обыкновенных дифференциальных уравнений восходит к Е. А. Барбашину [13], Х. Л. Массера и Х. Х. Шеферу [14]. Случай детерминированных функционально-дифференциальных уравнений изучался Н. В. Азбелевым и его учениками (см., например, [15] и приведённые там ссылки).

Стохастические функционально-дифференциальные уравнения.

Рассмотрим линейную задачу

$$\begin{aligned} dx(t) &= (Vx)(t)dZ(t), & t > 0, \\ x(s) &= \varphi(s), & s < 0, & x(0) = x_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для постановки задачи о допустимости пар пространств мы сначала должны переписать (2) в виде

$$\begin{aligned} dx(t) &= ((Vx)(t) + f(t))dZ(t), & t > 0, \\ x(0) &= x_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для получения (3) из (2) мы положим

$$(Vx)(t) := (Vx_+)(t), \quad (V^0x)(t) := (Vx_-)(t), \quad t > 0,$$

где

$$x_+ := xI_{[0, +\infty)}, \quad x_- := xI_{(-\infty, 0)},$$

а I_A - индикатор (характеристическая функция) множества A . Следовательно,

$$Vx = V(x_+ + x_-) = V(x_+) + V(x_-) = Vx + f,$$

где $f := V^0x$. Это даёт (3). Заметим, что f однозначно определяется функцией φ , задающей "предысторию" решения, и не зависит от самого решения $x(t)$, $t > 0$. Отметим также, что задача (3) эквивалентна задаче (2) только для тех f , которые представимы в виде $f = V^0\varphi_I$, где φ_I является каким-либо продолжением функции φ на всё $\mathbf{R}$. При изучении вопросов допустимости пар пространств для уравнения (1) мы фактически будем рассматривать более общие f , чем те, которые задаются формулой $f = V^0\varphi_I$ (см. теорему 1 ниже). Но этого вполне достаточно, если использовать свойство допустимости как достаточное условие для стохастической устойчивости.

Пример.

$$\begin{aligned} dx(t) &= \left(\int_{-\infty}^t x(s) d_s R(t, s) \right) dZ(t), & t > 0, \\ x(s) &= \varphi(s), & s < 0, & x(0) = x_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначив $(Vx)(t) = \left(\int_0^t x(s) d_s R(t, s) \right)$, $f(t) = \left(\int_{-\infty}^0 \varphi(s) d_s R(t, s) \right)$, мы получим форму (3).

Основной результат.

Начнём с обзора наиболее важных видов стохастической устойчивости в её классической форме. Ниже $x(t, x_0, \varphi)$ обозначает решение задачи (2), где $x_0 \in k^n$, а $\varphi(s)$, $s < 0$ - F_0 -измеримый случайный процесс с п. н. ограниченными траекториями.

Для данного вещественного числа p ($0 < p < \infty$) нулевое решение однородной задачи, соответствующей задаче

$$\begin{aligned} dx(t) &= (Vx)(t)dZ(t), & t > 0, \\ x(s) &= \varphi(s), & s < 0, & x(0) = x_0, \end{aligned} \quad (4)$$

называется:

- *p -устойчивым* по отношению к начальному значению x_0 и функции "предыстории" φ (или короче: по x_0 и φ), если для любого $\varepsilon > 0$ найдётся такое $\delta(\varepsilon) > 0$, что из неравенства $\mathbf{E}|x_0|^p + \text{vraisup}_{s < 0} \mathbf{E}|\varphi(s)|^p < \delta$ следует оценка $\mathbf{E}|x(t, x_0, \varphi)|^p \leq \varepsilon$, $t \geq 0$ для всех φ и x_0 ;
- *асимптотически p -устойчивым* по x_0 и φ , если оно p -устойчиво по x_0 и φ и, кроме того, для всех φ и x_0 , таких что $\mathbf{E}|x_0|^p + \text{vraisup}_{s < 0} \mathbf{E}|\varphi(s)|^p < \delta$, выполняется соотношение $\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbf{E}|x(t, x_0, \varphi)|^p = 0$;
- *экспоненциально p -устойчивым* по x_0 и φ , если существуют положительные константы $\bar{c}, \beta$, такие что $\mathbf{E}|x(t, x_0, \varphi)|^p \leq \bar{c} (\mathbf{E}|x_0|^p + \text{vraisup}_{s < 0} \mathbf{E}|\varphi(s)|^p) \exp\{-\beta t\}$ ($t \geq 0$) для всех φ и x_0 .

Приводимые здесь определения охватывают большинство известных видов стохастической устойчивости по x_0 и φ . Заметим, что другое название устойчивости по x_0 и φ – это устойчивость по Ляпунову.

Введём теперь понятие допустимости пар пространств для уравнения (1).

Пусть B – линейное подпространство пространства $L^n(Z)$. Предполагается, что пространство B наделено нормой $\|\cdot\|_B$. Для заданной положительной измеримой функции $\gamma(t)$ ($t \in [0, \infty)$) мы положим $B^\gamma = \{f: f \in B, \gamma f \in B\}$, что является линейным пространством с нормой $\|f\|_{B^\gamma} := \|\gamma f\|_B$.

Нам также понадобятся некоторые подпространства "пространства начальных данных" k^n и "пространства решений" D^n :

$$k_p^n = \{ \alpha: \alpha \in k^n, \|\alpha\|_{k_p^n} := (\mathbf{E} |\alpha|^p)^{1/p} < \infty \};$$

$$M_p^\gamma = \{x: x \in D^n, \|x\|_{M_p^\gamma} := \sup_{t \geq 0} (\mathbf{E} |\gamma(t)x(t)|^p)^{1/p} < \infty\}, \quad M_p^1 = M_p.$$

Через $x_f(\cdot, x_0)$ обозначим решение уравнения (1), такое что $x_f(0, x_0) = x_0$.

Определение. Говорят, что пара (M_p^γ, B^γ) допустима для уравнения (1), если найдётся $\bar{c} > 0$, для которого из $x_0 \in k_p^n$ и $f \in B^\gamma$ следует $x_f(\cdot, x_0) \in M_p^\gamma$ и выполнение следующей оценки:

$$\|x_f(\cdot, x_0)\|_{M_p^\gamma} \leq \bar{c} (\|x_0\|_{k_p^n} + \|f\|_{B^\gamma}).$$

В определении говорится, что решения принадлежат M_p^γ , как только $f \in B^\gamma$ и $x_0 \in k_p^n$, и они непрерывно зависят от f и x_0 в соответствующих топологиях. Выбор пространств тесно связан с видом интересующей нас устойчивости.

Следующий результат раскрывает связь между устойчивостью нулевого решения однородной задачи, соответствующей задаче (4), и допустимостью пар пространств для уравнения (1) с оператором V , который определяется по (4) способом, описанным в начале второго параграфа.

Теорема. Пусть дана положительная измеримая функция $\gamma(t)$ ($t \geq 0$). Предположим, что для k -линейного вольтеррова оператора V^0 , определённого, как и ранее, формулой $(V^0 x)(t) = (Vx)(t)$, $t > 0$, где $x = x_{(-\infty, 0)}$, (так что $x(t) = \varphi(t)$ при $t < 0$), случайный процесс $f = V^0 x$ принадлежит B^γ для всех φ , таких что $\text{vraisup}_{s < 0} \mathbf{E} |\varphi(s)|^p < \infty$, а норма f удовлетворяет оценке $\|f\|_{B^\gamma} \leq K \text{vraisup}_{s < 0} (\mathbf{E} |\varphi(s)|^p)^{1/p}$ для некоторой константы $K > 0$.

1) Если $\gamma = 1$ и пара (M_p^γ, B^γ) допустима для уравнения (1), то нулевое решение однородной задачи, соответствующей задаче (4), является p -устойчивым по x_0 и φ .

2) Если $\gamma(t) = \exp\{\beta t\}$, $\beta > 0$ и пара (M_p^γ, B^γ) допустима для уравнения (1), то нулевое решение однородной задачи, соответствующей задаче (4), является экспоненциально p -устойчивым по x_0 и φ .

3) Если $\lim_{t \rightarrow +\infty} \gamma(t) = +\infty$ и $\gamma(t) \geq \delta > 0$, $t \in [0, +\infty)$ для некоторого δ и пара (M_p^γ, B^γ) допустима для уравнения (1), то нулевое решение однородной задачи, соответствующей задаче (4), является асимптотически p -устойчивым по x_0 и φ .

Этот результат даёт возможность произвести эффективную переформулировку задачи: вместо стохастической устойчивости мы можем изучать допустимость соответствующих пар пространств случайных процессов. Некоторые конкретные результаты можно найти в работах [2], [16].

1. Р. Ш. Липцер, А. Н. Ширяев. Теория мартингалов. М.: Наука, 1986. 512 с.
2. R. I. Kadiev and A. V. Ponomarev. Stability of stochastic functional differential equations and the W-transform // Electron. J. Diff. Eqns. 2004. V. 2004, no. 92. P. 1-36.

3. J. A. D. Appleby and D. W. Reynolds. Non-exponential stability of scalar stochastic Volterra equations // Statist. Probab. Lett. 2003. V. 62, no. 4. P. 335-343.
4. L. Arnold. Random Dynamical Systems. Berlin – Heidelberg: Springer, 1998. 588 p.
5. V. B. Kolmanovskii and V. R. Nosov. Stability of Functional Differential Equations. New York: Academic Press. 1986. 217 p.
6. X. Mao. Stochastic Differential Equations and Applications. Chichester: Horwood Publishing Ltd. 1997. 360 p.
7. X. Mao and A. E. Rodkina. Exponential stability of stochastic differential equations driven by discontinuous semimartingales // Stochastics and Stochastics Reports. 1995. V. 55. P. 207-224.
8. V. J. Mizel and V. Trutzer. Stochastic hereditary equations: existence and asymptotic stability // J. Integral Equations. 1984. V. 7. P. 1-72.
9. S.-E. A. Mohammed. Stochastic Functional Differential Equations. Boston - London – Melbourne: Pitman Advanced Publishing Program. 1984. Research notes in Mathematics no. 99. 245 p.
10. S.-E. A. Mohammed. Stochastic Differential Equations With Memory. Theory, Examples and Applications // Proceedings of The Sixth Workshop on Stochastic Analysis. Geilo, Norway. 1996. P. 1-91.
11. M. K. R. Scheutzow. Stationary and Periodic Stochastic Differential Systems: A study of Qualitative Changes with Respect to the Noise Level and Asymptotics. Habilitationsschrift, Universität Keiserslautern, Germany. 1988. 181 p.
12. Е. Ф. Царьков. Случайные возмущения дифференциально-функциональных уравнений. Рига: Зинатне 1989. 421 с.
13. Е. А. Барбашин. Введение в теорию устойчивости. М.: Наука, 1967. 224 с.
14. Х. Л. Массера, Х. Х. Шефер. Линейные дифференциальные уравнения и функциональные пространства. М.: Мир. 1970. 456 с.
15. Н. В. Азбелев, П. М. Симонов. Устойчивость решений уравнений с обыкновенными производными. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. 230 с.
16. Р. И. Кадиев, А. В. Поносов. Input-to-state stability of linear stochastic functional differential equations // J. of Function Spaces. 2016. Article ID 8901563, 12 p.

Литвиненкова З.Н., Оснюк Е.А.

К вопросу о прочностном ресурсе воздушного судна

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi:10.18411/spc-12-10-2018-14

idsp: 000001:spc-12-10-2018-14

Аннотация

В конструкциях большинства летательных аппаратов есть тонкостенные элементы с технологическими и эксплуатационными дефектами типа остроконечных надрезов, трещин и иных концентраторов напряжений.

Принцип безопасного повреждения [1], применяемый в наше время наряду с принципом безопасного ресурса, допускает наличие подобных дефектов, но ставит задачу перед конструкторами учитывать их влияние на разрушающую нагрузку при расчете прочностного ресурса воздушного судна.

В работе дается уточненное решение задачи о растянутой нормальными напряжениями пластине с трещиной–разрезом с учетом деформации (выпучивания) в ее зоне. При расчете напряженно-деформированного состояния используются соотношения двумерной теории упругости в комплексной форме. Для оценки влияния выпучивания пластины на ее прочность применяется обобщенный метод Бубнова-Галеркина и энергетический подход Гриффитса.

Установлено, что в момент потери устойчивости предельная нагрузка резко снижается (на 25%), а при дальнейшем росте зоны выпучивания меняется незначительно. Этот эффект существенно сказывается на прочности пластинчатых элементов конструкций летательных аппаратов и должен учитываться на этапе проектирования конструкций.

Ключевые слова: прочность, обшивка самолета, пластина, трещина-разрез, концентрация напряжений, выпучивание (деформация), разрушающая нагрузка, безопасное повреждение.

Abstract

The paper gives a refined solution of the problem concerning extended by the normal strain plate that has a crack – cut with consideration of warping (buckling) in the crack zone. When calculating strain-deformed state the ratio of the two-dimensional theory of elasticity is used. To evaluate the influence of buckling of the plate on its strength the generalized method of Bubnov-Galerkin and Griffith energy approach is applied.

Keywords: strength, aircraft covering, plate, crack - the cut, the concentration of stress, buckling (warping), breaking load, safe damage.

Введение

Современная обшивка самолетов состоит из панелей или отдельных листов из алюминиевых сплавов (или титана и нержавеющей стали), отформованных по поверхности крыльев или фюзеляжа. В наше время в основном применяется жесткая металлическая обшивка, воспринимаемая нагрузки в виде крутящих и изгибающих моментов, внешние аэродинамические нагрузки и нагрузки перерезывающих сил, действующих на каркас самолета.

Опыт эксплуатации и ремонта летательных аппаратов показывает, что задолго до разрушения всей конструкции под воздействием упомянутых нагрузок появляются дефекты ее элементов, такие как трещины обшивки, местная потеря устойчивости обшивки (выпучивание), выпадение заклепок и т.д.

Используемый с недавнего времени принцип «безопасного повреждения» [1] позволяет учесть данные дефекты на этапе проектирования и тем самым минимизировать возможность выхода летательного аппарата из строя. Основное положение, на котором базируется концепция безопасного повреждения, состоит в том, что дефекты всегда существуют, даже в новых конструкциях, и что они могут оставаться необнаруженными. Таким образом, прочностной ресурс воздушного судна следует определять на основе критерия прочности, учитывающего наличие дефектов в материале конструкции и развитие трещин, которые не приводили бы к катастрофическому исходу.

Оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, содержащих концентраторы напряжений типа трещин, является наиболее ответственным и сложным этапом расчетов на прочность. Однако в них долгое время не учитывался тот факт, что рост трещины в тонколистовом материале сопровождается локальным выпучиванием в зоне трещины, оказывающим влияние на предельную разрушающую нагрузку [2, 3, 4]. По этой причине актуальным представляется изучение распределения напряжений в окрестности одиночных дефектов в пластинах с использованием разрешающих уравнений уточненных классических теорий и последующее построение критериев предельного равновесия с позиций теории разрушения.

Постановка и решение задачи

В данной работе в качестве базовой рассматривается задача о растяжении нормальными напряжениями $\sigma_y^\infty = P$ плоскости с прямолинейной трещиной-разрезом длины $2a$:

$$\begin{aligned} -a \leq x_1^0 \leq a \\ x_2^0 \geq 0, \end{aligned}$$

с берегами, свободными от напряжений (рис.1). Все величины, относящиеся к докритическому состоянию пластины, т.е. до потери устойчивости, будут помечены верхним индексом (x_1^0 и др.).

Местное выпучивание возникает в растянутой нормальными напряжениями $\sigma_y^\infty = P$ пластине в связи с наличием зоны сжимающих напряжений в области трещины, величина которых устанавливается при исследовании докритического состояния пластины по методу Вестергард.

Уравнения Вестергард имеют вид [5]:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \operatorname{Re} Z - y \operatorname{Im} Z' \\ \sigma_{22} = \operatorname{Re} Z + y \operatorname{Im} Z' \\ \tau_{12} = -y \operatorname{Re} Z' \end{cases} \quad (1)$$

где

Отметим, что функция Вестергард Z связана с комплексными потенциалами Колосова-Мусхелишвили [6] следующим образом:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2}Z, \quad \Psi(z) = -\frac{1}{2}zZ'$$

При введении локальной полярной системы координат с полюсом в конце разреза (ρ^0, φ^0) получена стандартная асимптотика напряжений и смещений:

$$\begin{cases} \sigma_\zeta^0 = \frac{\rho^0}{\sqrt{r^0}} \cos\left(\varphi^0 - \frac{\psi^0}{2}\right) - \frac{\eta}{\sqrt{(r^0)^3}} \sin \frac{3}{2}\psi^0 - 1 \\ \sigma_\eta^0 = \frac{\rho^0}{\sqrt{r^0}} \cos\left(\varphi^0 - \frac{\psi^0}{2}\right) + \frac{\eta}{\sqrt{(r^0)^3}} \sin \frac{3}{2}\psi^0 \\ \tau_{\zeta\eta}^0 = \frac{\eta}{\sqrt{(r^0)^3}} \cos \frac{3}{2}\psi^0 \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{x_1^0}{a}; \quad \eta = \frac{x_2^0}{a}; \quad \rho^0 = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2}; \\ r^0 &= \sqrt{(\zeta^2 - \eta^2 - 1)^2 + 4\zeta^2\eta^2}; \quad \varphi^0 = \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\zeta} \\ \psi^0 &= \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{2\zeta\eta}{\zeta^2 - \eta^2 - 1} + \pi, & \zeta < 1 \\ \operatorname{arctg} \frac{2\zeta\eta}{\zeta^2 - \eta^2 - 1}, & \zeta \geq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\zeta}^0 = \frac{\sigma_{11}}{P}; \quad \sigma_{\eta}^0 = \frac{\sigma_{22}}{P}; \quad \tau_{\zeta\eta}^0 = \frac{\tau_{12}}{P}$$

Напряжения σ_{ζ}^0 , σ_{η}^0 , $\tau_{\zeta\eta}^0$ были подсчитаны на ЭВМ на прямых $x = \pm a$ при различных значениях η от 0,01 до 2,5. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что сжимающие напряжения на кромках $x = \pm a$ максимальны при $0 \leq \eta < 0,5$ и близки к 0 при $\eta \geq 1,1$.

Эти сжимающие напряжения вызывают выпучивание пластины в зоне трещины. Для оценки влияния потери устойчивости на разрушающую нагрузку зона локального выпучивания моделируется полосой L (рис. 1), шириной $2a$, нагруженной по длинным кромкам напряжениями, полученными по формулам (2). Граничные условия задачи формулируются из следующих соображений: на длинных кромках полосы приняты условия упругого защемления с коэффициентом упругой заделки β . Это связано с тем, что при небольшом прогибе пластина (полоса) работает в условиях жесткого защемления длинных сторон ее контура, а при прогибе, соизмеримом с толщиной пластины, ее края можно считать с достаточной степенью точности шарнирно-опертыми.

В дальнейшем проводится численный эксперимент для двух крайних случаев:

а) жесткой заделки (при $\beta = \infty$) и

б) шарнирного опирания (при $\beta = 0$)

краев полосы, то есть при $\zeta = \pm 1$ выполняются граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{а) } \omega = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} = 0 \quad \text{при } \zeta = \pm 1 \\ \text{б) } \omega = 0, \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} = 0 \quad \text{при } \zeta = \pm 1 \\ \text{При } \eta = 0 \text{ (берег трещины – разреза) граничные условия таковы:} \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta \partial \zeta^2} = 0 \\ \text{При } \eta \rightarrow \infty, \quad \omega \rightarrow 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Критические (эйлеровы) напряжения определяются из дифференциального уравнения задачи:

$$D \nabla^4 \omega - P h a^2 \left(\sigma_{\zeta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} + \sigma_{\eta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + 2 \tau_{\zeta\eta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta \partial \eta} \right) = 0 \quad (4)$$

Здесь

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}$$

– цилиндрическая жесткость пластины, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона,

h – толщина пластины, ω – прогиб пластины в поперечном направлении (перпендикулярно плоскости x_1^0, x_2^0).

Краевая задача (3)–(4) решается вариационным методом (обобщенный метод Бубнова-Галеркина) [7].

$$\int_{-1}^1 \int_0^\infty \left\{ \nabla^4 \omega - \lambda \left[\sigma_{\zeta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} + \sigma_{\eta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + 2 \tau_{\zeta\eta}^0 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta \partial \eta} \right] \right\} \delta \omega d\zeta d\eta -$$

$$- \int_{-1}^1 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \delta \omega d\zeta \Big|_{\eta=0} - \int_{-1}^1 \left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta \partial \zeta^2} \right] \delta \omega d\zeta \Big|_{\eta=0} = 0 \quad (5)$$

Здесь

$$\lambda = \frac{Pha^2}{D} \quad (6)$$

Форма выпученной поверхности задается в виде:

$$\omega(\zeta, \eta) = \sum_{m=2}^p \sum_{n=1}^q A_{mn} \omega_{mn}, \quad (7)$$

где $\omega_{mn} = \cos^m \frac{\pi \zeta}{2} e^{-n\eta}$

Подставляя (7) в (5), получим квадратичную форму с коэффициентами A_{mn} . Минимизируя ее, находим r значений параметра λ , наименьшее из которых позволяет определить из выражения (6) критическое значение растягивающей нагрузки.

$$P_{кр} = \frac{D\lambda_{\min}}{ha^2} = K \frac{\pi^2 D}{a^2 h} = K_1 E \left(\frac{h}{a} \right)^2 \quad (8)$$

Численная реализация указанного метода осуществляется на ЭВМ. Были получены следующие значения коэффициента K_1 в формуле (8):

$$1,08 \leq K_1 \leq 1,2$$

При сравнении полученной в соответствии с формулой (8) зависимости критической нагрузки от толщины для образцов из стали и из алюминиевых сплавов с экспериментальными данными усматривается их хорошее согласование [2,4].

Потеря устойчивости плоской пластины приводит к изменению напряженного состояния у вершины трещины и, следовательно, влияет на процесс разрушения.

Далее в работе оценивается прочность пластины с выпучиванием в зоне трещины с использованием энергетического критерия Гриффитса [8]. При этом предполагается, что линии главных напряжений обтекают выпученную область таким же образом, как если бы на ее месте в пластине имелось сквозное эллиптическое отверстие с полуосями $\max |x_1^0| = a$ и $\max |x_2^0| = b$, $b = 1,1a$.

Основное уравнение теории Гриффитса имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial a} [T(a) - W(a, b, P)] = 0,$$

где $T(a) = 4\gamma_0 a$ – поверхностная энергия трещины,

γ_0 – плотность поверхностной энергии материала,

$W(a, b, P)$ – энергия упругого деформирования, обусловленная раскрытием трещины и увеличением протяженности выпученной зоны при возрастании напряжений P .

Для $W(a, b, P)$ имеем:

$$W(a, b, P) = \frac{\pi P^2}{2E} (2a^2 + ab)$$

Подставляя выражения для T и W в уравнение Гриффитса, находим разрушающую нагрузку P^* (с учетом выпучивания):

$$P^* = \sqrt{\frac{8\gamma_0 E}{\pi(4a + b)}}$$

Обозначим разрушающую нагрузку невыпученной пластины с трещиной через P_0^* . Эта величина может быть получена по формуле для P^* при $b = 0$.

$$P_0^* = \sqrt{\frac{2\gamma E}{a\pi}},$$

которая совпадает с известной формулой Ирвина [9].

Рассмотрим отношение

$$s = \frac{P^*}{P_0^*} = \frac{2}{\sqrt{4 + b/a}}$$

Предположим, что нагрузка, приложенная к бесконечной пластине, превышает критическую:

$$P = KE \left(\frac{h}{a} \right)^2,$$

где $K > 1,08$.

Оценим влияние выпучивания на разрушающую нагрузку, установив зависимость параметра s от коэффициента внешней нагрузки K :

$$s = f(K)$$

Анализ этой зависимости приводит к выводу, что в момент потери устойчивости предельная нагрузка резко падает ($\approx$ на 25%), а при дальнейшем росте зоны выпучивания меняется незначительно. Критическая длина трещины при этом уменьшается.

Литвиненкова З.Н. впервые получила аналитическое решение рассматриваемой задачи в первом приближении с использованием метода Ритца [3,4], до этого имелись лишь экспериментальные исследования. При решении задачи было установлено снижение разрушающей нагрузки на 20%. В данной работе изменен подход к решению задачи, использован более строгий математический аппарат, даны развитие и уточнение полученных ранее результатов (выявлено более существенное падение разрушающей нагрузки, что согласуется с экспериментальными данными [2,4]). Кроме того, установлено, что появление выпучины вызывает уменьшение значения критической длины трещины при неизменной внешней нагрузке

Заключение

Исследование задач деформации и разрушения плоских высоконапряженных элементов обшивки летательных аппаратов является крайне необходимым для того, чтобы корректировать методики расчета их прочности. Выявленный в работе факт существенного снижения предельной разрушающей нагрузки вследствие выпучивания берегов трещины должен приниматься во внимание конструкторами при расчетах на прочность для обеспечения безопасности полетов.

1. Нестеренко Г.И. Требования по усталости и живучести конструкций гражданских самолетов. // Научный вестник МГТУГА № 163, 2011
2. Гольцев В.Ю. и др. Заводская лаборатория № 1, 1961
3. Литвиненкова З.Н. Об устойчивости растянутой пластины с внутренней трещиной. // Известия АН СССР, Механика твердого тела № 5, 1973
4. Литвиненкова З.Н. Разрушающая нагрузка растянутых плоских элементов конструкций самолета (обшивки) у мест выточек. // Вестник СПбГУГА, выпуск 2, 2011
5. Вестергард Г.М. Несущие давления и трещины. // Журнал прикладной механики, том 6, с. А 49-53, 1939
6. Мухелишвили И.Н. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., «Наука», 1966
7. Галеркин Б.Г. Собрание сочинений. Т. 1. // Изд-во АН СССР, 1952
8. Griffith A.A. The theory of rupture. // Proc. First. Inter. Congress Appl. Mech. Delft., p. 55-63, 1924
9. Irvin G.R. Relation of stresses near a crack to the crack extension force. // Proc.9-th Inter. Congr. Appl. Mech, vol.8, Brussels, 1957

Мамедова Ф.М.**Магний-натрий катионирование минерализованных вод широкого класса***Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности**doi:10.18411/spc-12-10-2018-15**idsp: 000001:spc-12-10-2018-15***Аннотация**

Приведены результаты исследований по установлению основных количественных закономерностей процесса Mg-Na катионирования минерализованных вод широкого класса - солесодержанием от 2,5 до 35 г/л. Разработана математическая модель процесса для исследования и оптимизации технологии в целом.

Ключевые слова: минерализованная вода, ионирование, магниевой жесткость, математическая модель, рабочая обменная емкость.

Abstract

The results researchs by determination of the base quantitative regularities of the Mg-Na zeolite softening of wide class mineralized water with salt content from 2,5 up to 35 g/l are given. The mathematical model of the process for investigation and optimization of technology in whole was worked out.

Keywords: mineralized water, ion exchange process, magnesium hardness, mathematical model, working exchange capacity

Для использования огромных запасов минерализованных вод (*морской, грунтовой, пластовых*) вместо пресной воды в системах технического водоснабжения промышленных предприятий требуется *решение* ряда научно-технических задач, наиболее важным из которых является предотвращение накипе-образования при нагреве и выпаривании воды. Магний-натрий катионирование является эффективным методом решения этой задачи. Он основан на предварительной ионообменной замене катионов кальция исходной воды на катионы магния и натрия этой же воды, разработан Г.К.Фейзиевым и подробно исследован на каспийской воде. Установлена эффективность метода и при обработке узкого класса слабосоленоватых вод-солесодержанием от 1 до 2,5 г/л.

Целью настоящей работы являлось исследование основных количественных закономерностей процесса Mg-Na катионирования природных минерализованных вод широкого класса - солесодержанием от 2,5 до 35 г/л, разработка математической модели процесса для исследования и оптимизации технологии в целом.

На рис. приведены выходные кривые сорбции на катионите КУ-2 для воды с ионным составом (мг-экв/л); $C_{Ca}=C_{Mg}=15$, $C_{Na}=170$. Из рисунка следует, что как и в случае каспийской воды работа фильтра характеризуется формированием двух фронтов обмена. Поэтому в первых 12 литрах фильтрата наблюдается снижение не только кальциевой, но и магниевой жесткости до 2 мг-экв/л. Затем происходит вытеснение магния более избирательными катионами кальция. Удельная выработка воды до проскока Mg^{2+} составляет 26 л/л катионита, а до проскока кальция -46 л/л. Обменная емкость катионита - 680 г-экв/м³, остаточная концентрация кальция-0,2 мг-экв/л, т.е. достигается почти 99% удаление кальция.

Выходные кривые Mg-Na- катионирования солоноватой воды:
1- C_{Ca} ; 2- C_{Mg} ; 3- C_{Na} ; 4- $C_{Mg}^{исх} = C_{Na}^{исх}$; 5- $C_{Na}^{исх}$

Высокие технологические показатели достигаются при Mg-Na- катионировании других типов минерализованных вод, охватывающих рассматриваемый класс. В таблице 1. приводятся результаты опытов по противоточному ионированию воды, свидетельствующие об этом. Здесь в качестве выходных показателей процесса приведены: обменная емкость катионита по кальцию (E_p , г-экв/м³), удельная выработка воды (д, м³ / м³), остаточные концентрации кальция и магния ($C_{Ca}^{ост}$, $C_{Mg}^{ост}$, мг-экв/л.) а также количество солей исходной воды, которое может быть использовано для регенерации (g, г-экв/л).

Таблица 1.

Результаты опытов по Mg-Na катионированию

Исходная вода, мг-экв/л			g	E_p	d	$C_{Ca}^{ост}$	$C_{Mg}^{ост}$
C_{Na}	C_{Ca}	C_{Mg}					
50	5	5	7,7	640	128	0,02	2
100	10	10	6,7	670	67	0,10	6
170	15	15	8,4	710	47	0,22	8
136	16	60	7,0	525	33	0,22	48
248	13	59	9,9	400	31	0,35	40
470	20	110	11,0	300	15	0,63	75

Как следует из полученных данных даже для вод с высоким содержанием противоионов (близких к океанской, опыт и 6) достигаются высокие значения удельной выработки воды при степени удаления кальция 97 % и больше.

Центральной задачей любой ионообменной технологии является разработка математической модели процесса, позволяющей прогнозировать технологические показатели процесса в зависимости от ионного состава воды, условий сорбции и регенерации. К указанным технологическим показателям относятся; рабочая обменная емкость катионита по ионам Ca_2^+ и остаточное содержание этих катионов в обработанной воде. Существуют несколько подходов к решению таких задач:

- разработка функциональной (экспериментально-статистической) модели, описывающей процесс без учета его механизма;
- разработка полуэмпирических моделей, которые описывают процесс в целом и отражают отдельные аспекты механизма ионного обмена;
- разработка чисто детерминированных моделей, достаточно полно отражающих механизм изучаемого процесса.

Последний подход является наиболее эффективным и одновременно наиболее сложным, применяется в основном при фундаментальных исследованиях.

Полуэмпирический подход, использованный Г.К.Фейзиным основан на следующей формуле для расчета основного технологического показателя процесса - рабочей обменной емкости катионита (E_p).

$$E_p = \alpha_p \cdot E_{\text{pab}} [1 - h_{3c}(1 - \delta)/h_0], \text{ г-экв/м}^3 \quad (1)$$

Где α_p - коэффициент эффективности регенерации; E_{pab} - полная динамическая (равновесная) обменная емкость катионита по катионам кальция, г-экв/м³; δ - коэффициент, учитывающий неполноту использования обменной емкости катионита в защитном слое; h_{3c} - высота защитного слоя катионита, м; h_0 - общая высота слоя катионита, м.

Приводятся эмпирические формулы, описывающие зависимость α_p и h_{3c} от основных факторов при Mg - Na - катионировании каспийской воды (1) предлагается расчет E_p -проводить на основании формулы закона действующих масс.

Согласно расчетам ионных равновесий остаточные концентрации Ca^{2+} надежно исключают выпадение CaCO_3 и CaSO_4 при нагреве и выпаривании минерализованных вод составляют 0,1 - 0,3 мг-экв/л, что в ряде случаев достигается даже при одноступенчатом противоточном или двухпоточно-противоточном Mg - Na - катионировании (табл.1.). Более глубокое удаление Ca^{2+} достигается на фильтрах вторых ступеней. Поэтому при разработке математической модели процесса можно ограничиться получением системы соотношений, позволяющих рассчитывать рабочую обменную емкость катионита, включив глубину удаления Ca^{2+} разряд показателей, на которые накладываются ограничения.

Анализ формулы (1) показывает на ее универсальность с точки зрения пригодности для расчета процесса Mg - Na - катионирования минерализованных вод произвольного состава. Поэтому задачи настоящих исследований сводились к получению функциональных зависимостей h_{3c} , E_{pab} и α_p от определяющих факторов процесса. К числу последних относятся общее солесодержание исходной воды (C_0), общая жесткость воды (J_0), доля кальция в общей жесткости (ΔCa) и скорость воды фильтрования (V). Объект исследования составляли минерализованные воды с солесодержанием от 2,5 до 35 г/л, жесткостью от 30 до 120 мг-экв/л, кальциевой составляющей - от 20 до 50 % от общей жесткости.

На основании предварительных исследований было признано целесообразным разбить исследуемую область на две подобласти в пределах каждой из которых возможна более точная аппроксимация искомых функциональных зависимостей.

Исходя из данных [1] предполагали, что зависимость $h_{3c} = f(C_0, J_0, \Delta\text{Ca}, V)$ может быть с достаточно высокой точностью аппроксимирована степенным уравнением типа

$$h_{3c} = a \cdot C_0^{\alpha_1} \cdot J_0^{\alpha_2} \cdot \text{Ca}_0^{\alpha_3} \cdot V^{\alpha_4} \quad (2)$$

где $a, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и α_4 - эмпирические коэффициенты.

Исследования проводили на катионите КУ-2 методом математического планирования эксперимента. Факторы, влияющие на высоту защитного слоя катионита и их уровни представлены в таблице 2.

Таблице 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

уровни	факторы			
	$C_0(x_1)$, мг-экв/л	$J_0(x_2)$, мг-экв/л	$\Delta\text{Ca}(x_3)$	$V(x_4)$ м/л
Верхний /+/	200	30	0.5	20
	550	120	0.5	20
Нижний /-/	40	10	0.2	5
	200	30	0.2	5
Нулевой /0/	120	20	0.35	12.5
	375	75	0.35	12.5

Примечание : в числителе значения факторов по солоноватым, а в знаменателе по соленым водам.

Определение величины h_{3c} для каждого опыта проводилось согласно методики / I /. Так как уравнение (2) линеаризуется после логарифмирования, то обработку результатов расчетов проводили логарифмируя полученные значения h_{3c} .

В результате статистической обработки экспериментальных данных по /5/ получили полином следующего вида (для солоноватых вод):

$$Y = 1,36 + 0,079 X_1 + 0,146 X_2 + 0,0445 X_3 + 0,0824 X_4 \quad (3)$$

Для перевода уравнения (3) в натуральной масштаб использовали выражение (5):

$$x_i = \frac{2(\lg \tilde{x}_i - \lg \tilde{x}_i^b)}{\lg \tilde{x}_i^b - \lg \tilde{x}_i^H} + 1 \quad (4)$$

Где - $\tilde{x}_i$ -кодированное значение; i -го фактора; $\tilde{x}_i^b$ - натуральное значение верхнего уровня i -го фактора; $\tilde{x}_i^H$ - натуральное значение нижнего уровня i -го фактора.

В результате перехода от кодированных значений факторов к натуральным получили:

$$\lg Y = 0,0678 + 0,234 \lg C_o + 0,524 \lg ж_o + 0,025 \lg Ca + 0,33 \lg V \quad (5)$$

после потенцирования.

$$h_{3c} = 1,17 \cdot C_o^{0,23} \cdot ж_o^{0,52} \cdot \Delta C_o^{0,33} \cdot V^{0,33}, \text{ см} \quad (6)$$

Аналогичная формула, но с другими эмпирическими коэффициентами получена для соленых вод

$$h_{3c} = 1,19 \cdot C_o^{0,35} \cdot ж_o^{0,24} \cdot \Delta C_o^{0,15} \cdot V^{0,38}, \text{ см} \quad (7)$$

Интерпритация полученных формул показывает что для солоноватых вод величина h_{3c} изменяется в пределах 10÷50 см, а для соленых - 40÷90 см, т.е. в среднем увеличивается в два раза. Характер влияния всех факторов на h_{3c} одинаков: повышение каждого из них способствует росту h_{3c} . Вместе с тем для обеих типов вод из четырех рассматриваемых факторов – общая жесткость воды оказывает более заметное влияние на h_{3c} .

Дисперсионный анализ показал, что при исследовании влияния основных факторов на коэффициент эффективности регенерации катионита (α_p) в исследуемой области значимыми являются три фактора: C_o и C_{ca} и удельный расход соли на регенерацию катионита - g и эта зависимость также может быть аппроксимирована уравнением степенного вида.

Были получены две расчетные формулы. Для солоноватых вод.

$$\alpha_p = 0,6 \cdot C_{ca}^{0,04} \cdot g^{0,24} \cdot C_o^{-0,057} \quad (8)$$

Для соленых вод

$$\alpha_p = 0,65 \cdot C_{ca}^{0,043} \cdot g^{0,31} \cdot C_o^{-0,078} \quad (9)$$

В первом случае: $C_{ca}=5\div15$, $C_o=40\div 200$ мг-экв/л, во втором 10÷50 и 200 ÷ 600 мг-экв/л соответственно. Для всего диапазона $g = 4\div10$ г-экв/л катионита.

Расчеты по полученным формулам показывают, что исследуемой области значения α_p изменяются в пределах 0,7-0,97 и наиболее значимым из рассмотренных факторов является удельный расход соли.

Метод математического планирования был использован и при исследовании зависимости равновесной обменной емкости катионита от основных факторов. На основании предварительных исследований была установлена целесообразность

аппроксимации этой зависимости уравнением линейной регрессии. Получены следующие уравнения регрессии. Для солоноватых вод

$$E_{\text{рав}} = 427 - 2 \cdot C_0 + 0,1 \cdot ж_0 + 490 \cdot \Delta Ca + 46,0 \cdot ж_0 \cdot \Delta Ca \quad (10)$$

Для соленых вод

$$E_{\text{рав}} = 238 - 0,77 \cdot C_0 + 2,8 \cdot ж_0 + 1494 \Delta Ca + 7,7 \cdot ж_0 \cdot \Delta Ca - 0,76 \cdot C_0 \Delta Ca \quad (11)$$

Анализ выражений (10) и (11) показывает, что величины $E_{\text{рав}}$ изменяются в интервале $450 \div 1300$ г-экв/м³ в области солоноватых вод, а $240 \div 1200$ г-экв/м³ в области соленых вод. По значимости влияния факторов на величину $E_{\text{рав}}$ первые располагаются в следующем порядке: $\Delta Ca, C_0, ж_0$

Совокупность соотношений (1)÷(11) представляет собой математическую модель процесса Mg - Na - катионирования минерализованных вод широкого класса. С учетом особенностей организации процесса в фильтрах периодического действия и соображений технологической целесообразности эта модель дополняется системой ограничений на скорость фильтрования воды (V) высоту слоя катионита (h_0), удельный расход магниевых и натриевых солей на регенерацию катионита (g) а также остаточное содержание ионов кальция ($C_{Ca}^{\text{ост}}$):

$$3 \div 5 \leq V \leq 25 \div 30 \text{ м/ч} \quad (12)$$

$$1,5 \leq h_0 \leq 6 \text{ м} \quad (13)$$

$$2 \leq g \leq g_{\text{рас}} \text{ г-экв/л} \quad (14)$$

$$C_{Ca}^{\text{ост}} \leq 0,1 \text{ мг-экв/л} \quad (15)$$

В выражении (14) располагаемое количество солей ($g_{\text{рас}}$) рассчитывается по формуле

$$g_{\text{рас}} = K_p \frac{E_p}{ж_0 \cdot \Delta Ca} \cdot C_0 \cdot 10^{-3} \text{ г-экв/л} \quad (16)$$

где K_p - коэффициенты учитывающие повторное использование отработанного регенерационного раствора, $K_p = 1,1 \div 1,4$

Таблица 3

Результаты расчетного и экспериментального определения

$E_p (V=15 \text{ м/ч}, h_0=1,75 \text{ м})$.

Исходная вода			$E_{\text{рав}}$ г-экв/м ³	g г-экв/м ³	α	E_p г-экв/м ³	
C_0	$ж_0$	C_{Ca}				Расч.	Экспер.
60	10	5	906	10,8	0,89	660	640
120	20	10	898	4,4	0,71	586	560
200	30	15	964	11,8	0,89	730	680
212	76	26	690	8,3	0,91	512	525
220	72	13	518	12	0,97	408	400
300	130	20	445	12	0,95	327	300

Адекватность полученной модели проверялось путем сопоставления расчетных значений E_p с экспериментальными, приведенными в таблице 1. Как следует из полученных результатов (табл.3) среднее отклонение экспериментальных и расчетных значений E_d не превышает 7%, что вполне приемлемо выполнения практических расчетов.

Полученная модель была использована для исследования влияния высоты слоя катионита на обменную емкость катионита в пределах значений указанного фактора, которые не могут быть выдержаны в лабораторных условиях. Установлено, что с повышением высоты слоя катионита от 1 до 3 м рабочая обменная емкость катионита увеличивается на 18%, 12% и 20% соответственно при обработке каспийской, черноморской и океанской вод. Дальнейшее повышение высоты слоя катионита слабо отражается на величине рабочей обменной емкости.

Таким образом получена математическая модель процесса Mg-Na-катионирования минерализованных вод широкого класса, позволяющая всесторонне исследовать и оптимизировать этот процесс решать- практические задачи по расчету и проектированию водоподготовительных установок, обеспечивавших безнакипный режим работы теплотехнических систем предприятий нефтедобычи, нефтепереработки, промышленной и тепловой энергетики и других отраслей промышленности.

1. Фейзиев Г. К. Новый способ для предотвращения образования сульфатной накипи на поверхностях нагрева дистилляционных опреснительных установок // Теплоэнергетика, 1972, № 3 в. 74-75.
2. Фейзиев Г.К. Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания,. М.: Энергоатомиздат, -1988. -192с.
3. Исследование технологии Mg - Na - катионирования природных и сточных вод с рекуперацией обработанных растворов / Л.Н.Полетаев, М.М.Агамалиев, Э.А.Мамедова // Химия и технология воды, 1991, т. 13, № 3, с.637-641.
4. Сенявин М.М. Ионный обмен в технологии и анализе неорганических веществ.. М.: Химия, 1980. - 272с.
5. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981.- 184 с.

Научное издание

**Научный диалог:
Вопросы точных и технических наук**

Сборник научных трудов, по материалам
XIX международной научно-практической конференции
12 октября 2018 г.

SPLN 001-000001-0344-TT

Подписано в печать 27.10.2018. Тираж 400 экз.
Формат.60х841/16. Объем уч.-изд. л.3,68
Бумага офсетная. Печать оперативная.
Отпечатано в типографии НИЦ «Л-Журнал»
Главный редактор: Иванов Владислав Вячеславович