

хода пара на 10% от номинального значения на 150-й секунде. Из графиков видно, что снижение расхода пара отрабатывается регулятором, управляющим подачей питательной воды в ПГ, всего за один импульс. Расход питательной воды приводится в соответствие с расходом пара, положение клапана в рабочем диапазоне меняется менее чем на 5%. Уровень в ПГ поддерживается в зоне требуемой точности  $\pm 50$  мм.

Следует отметить, что отработка возмущающего воздействия за малое число формируемых регулятором импульсов наблюдалась в большинстве реализаций. В результате проведенных исследований сделан вывод, что предлагаемый метод оптимизации на основе генетического алгоритма эффективен при автоматизированном проектировании для оптимизации САР с учетом действующих случайных возмущений.

#### Заключение

Разработанная математическая модель питания парогенератора позволяет выполнять настройку каналов регулирования ПТК САР ПГ и тестовые расчеты динамических характеристик в переходных режимах с глубокими изменениями нагрузки различной природы с учетом действующих случайных возмущений.

В результате проведения динамических испытаний на разработанной модели подтверждено, что ПТК САР ПГ обеспечивает поддержание параметров ПГ в пределах требований нормальной эксплуатации блока. Использование математической модели пита-

ния парогенератора с учетом действующих случайных возмущений, реализованной на испытательном стенде ЗАО "Автоматика-Э", позволяет в короткие сроки провести испытание системы регулирования в различных режимах работы и выработать рекомендации по оптимизации параметров ПТК САР ПГ.

#### Список литературы

1. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Надточий П.Н. Программно-технический комплекс для регулирования питания парогенераторов энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2012. №11.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Уч. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана. 2004.
3. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Сеницын В.П., Нестеров Ю.В. Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока // Автоматизация в промышленности. 2010. №7.
4. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
5. Дьяконов В.П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.
6. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управления. М.: Наука, 2009. 228 с.
7. Денисова Л.А., Мещеряков В.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. 2012. №7.

*Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э». Контактный телефон (381-2) 23-23-43. E-mail: ladenisova@mail333.com*

## Опыт применения имитационной модели демонтажа кладки реактора АМБ-100 Белоярской АЭС

**Б.К. Былкин (НИЦ «Курчатовский институт»)**

**В.В. Кононов, В.Л. Тихоновский, Д.В. Чуйко, П.А. Бунто,**

**Д.В. Свиридов, В.Е. Трифонов (ЗАО «НЕОЛАНТ»)**

*Изложен опыт практического применения имитационного моделирования при отработке технологии демонтажа графитовой кладки реактора первого блока Белоярской АЭС.*

*Ключевые слова: АЭС, имитационное моделирование, реактор АМБ-100, графитовая кладка, технология демонтажа, аварийные ситуации.*

#### Введение

Вывод из эксплуатации (ВЭ) — завершающая стадия жизненного цикла блока АЭС, сравнимая по сложности и продолжительности со стадией эксплуатации. Но в отличие от эксплуатации — это затратный этап, который в силу своих особенностей оказывает существенное влияние на суммарные показатели эффективности АЭС.

В связи с потенциальной длительностью, сложностью и опасностью процесса ВЭ в требованиях нормативно-технических и руководящих документов

Ростехнадзора и Концерна РЭА определено создание и наполнение информационной системы БД вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС (ИС БДВЭ) с использованием трехмерного моделирования с целью всестороннего информационного сопровождения процесса ВЭ АЭС [1].

Основной целью создания и применения имитационной модели ВЭ блока АЭС является снижение издержек и повышение безопасности осуществления выбранного варианта ВЭ блока АЭС за счет системного управления требованиями к проекту ВЭ,

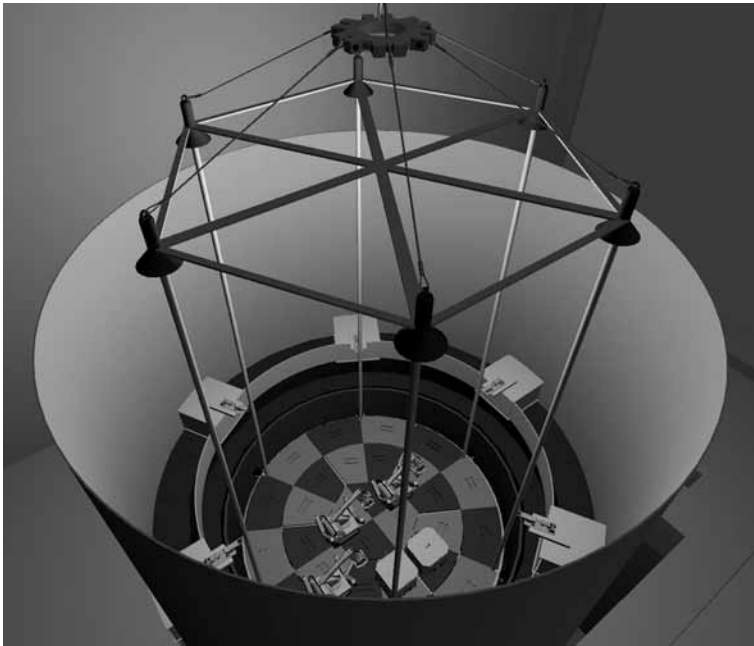


Рис. 1. Общий вид карусели

предварительного многофакторного<sup>1</sup> компьютерного имитационного моделирования и оптимизации осуществления как всего процесса ВЭ в целом, так и его отдельных наиболее сложных технологических операций, итеративной верификации проекта ВЭ на предмет удовлетворения сформулированным требованиям [2].

В рамках работ по созданию имитационной модели разборки (демонтажа) реактора первой очереди Белоярской АЭС был разработан программный комплекс, предназначенный для моделирования технологических операций по разборке кладки реактора АМБ-100 и обучения работе операторов робота BROKK в процессе разборки кладки реактора в рамках моделируемых технологических операций.

В соответствии с обрабатываемой технологией демонтажа было произведено графическое и физическое моделирование шахты реактора АМБ-100 со всеми содержащимися в ней объектами.

Согласно моделируемой технологии демонтаж кладки выполняется роботом, для перемещения которого в объеме шахты реактора служит специальная конструкция, называемая каруселью (рис. 1), которая опускается в шахту реактора.

Для разборки кладки в соответствии с технологией используются три различных навесных инструмента для робота BROKK:

- захватом-манипулятором робот опускает и поднимает плиты настила, крышки контейнеров, в которые помещаются изъятые блоки и отпиленные куски стояков СУЗ, а также захватывает куски треснувших блоков;
- цанговым захватом робот захватывает и опускает графитовые блоки, используя отверстия в их центре;

<sup>1</sup> В качестве факторов могут рассматриваться: точность позиционирования, ограниченность поля зрения с телевизионных камер в конкретных конфигурациях их расположения; стесненность перемещения робота; ограничения грузоподъемности манипулятора и т.д.

• циркулярной пилой робот отпиливает верхние части стояков СУЗ, препятствующих изъятию блоков цанговым захватом.

Моделирование основано на «запрете» взаимного проникновения объектов друг в друга, учитывает действие силы тяжести на объекты, движение гусениц, манипуляторов и навесных инструментов роботов.

Программный комплекс выполнен в двухэкранной конфигурации. На одном экране располагается окно с трехмерной моделью, визуализирующей сценарий рабочего процесса демонтажа. На другом экране располагается окно с графическим интерфейсом, предоставляющим дополнительные возможности по управлению моделированием, установкой камер, осуществлением записи, воспроизведением записанных сценариев, и т. д.

Для реализации требуемой функциональности комплекс способен работать в двух режимах: имитации и воспроизведения.

*В режиме имитации* пользователь с помощью устройств ввода в режиме реального времени управляет роботами, осуществляя ими операции, необходимые для демонтажа кладки. Этот режим позволяет проверить выполнимость моделируемых технологических операций, удобство работы оператора в условиях моделируемой конфигурации оборудования (размещение обзорных камер, элементов освещения и т.д.), а также позволяет моделировать различные аварийные ситуации с извлекаемыми блоками.

*В режиме воспроизведения* пользователь может просматривать ранее записанные сценарии, имея возможность в любом месте сценария остановить воспроизведение и продолжить имитацию. Этот режим предназначен для анализа отработанных операторами технологических операций и выявления проблемных мест моделируемой технологии с целью ее дальнейшего улучшения.

#### Трехмерная модель

Окно трехмерной модели позволяет отображать данные с различных камер наблюдения для моделирования условий, приближенных к предполагаемым условиям в ходе демонтажа графитовой кладки.

В окне трехмерной модели можно расположить до четырех камер наблюдения одновременно, управляя их размещением с помощью элемента управления камерами, расположенного на экране графического интерфейса (рис. 2).

Камеры могут быть как стационарно расположенные, так и размещенные на насадках робота.

Также имеется возможность управлять свободной камерой, которая может перемещаться в любых на-

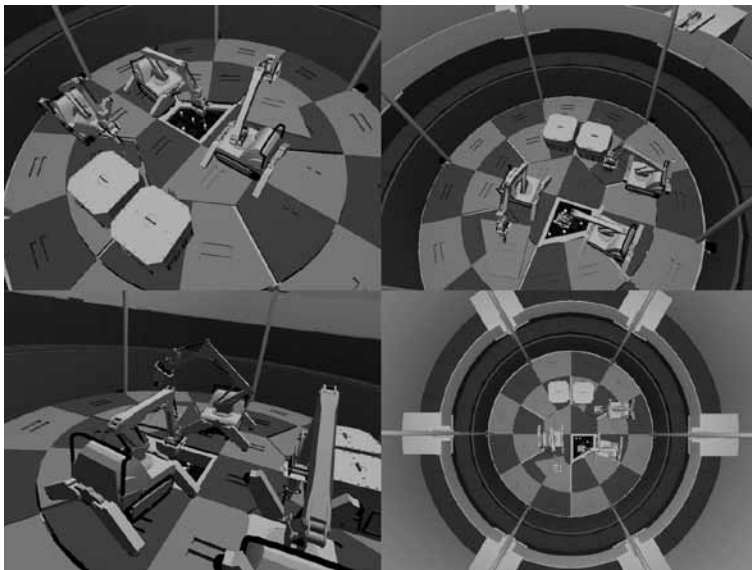


Рис. 2. Имитационная модель, вид с четырех камер

правления по «сцене», однако, поскольку при реальном рабочем процессе такой камеры не будет, она носит вспомогательный характер, в основном для обозрения сцены в режиме воспроизведения записанного сценария. В режиме имитации свободная камера может использоваться в случае, если остальные камеры не позволяют дать необходимый уровень обзора для выполнения требуемой операции. При этом все факты включения свободной камеры фиксируются и отображаются в режиме воспроизведения, чтобы показать, что для выполнения данной операции текущее расположение камер не подходит, и его необходимо изменить.

Управление реальными роботами BROKK осуществляется с помощью пульта управления.

В имитационной модели реализовано управление роботами с помощью пульта управления BROKK, подключаемого к компьютеру. Но для случаев, если этот пульт по какой-либо причине отсутствует, роботами можно управлять с помощью клавиатуры и двух игровых устройств — геймпадов, имитирующих взаимодействие с пультом управления BROKK. Все элементы управления пульта, а также внутренняя логика его работы точно воспроизведены в соответствии с оригиналами.

Элементы управления геймпадов имитируют элементы управления пульта робота, например, рычаги пульта соответствуют рычагам на геймпаде. Также все элементы управления, реализованные на геймпаде, располагаются на клавиатуре вместе с дополнительными элементами управления.

Каждому роботу соответствует свой пульт управления, в программе же имитируются два пульта, поэтому реализована возможность «переключения» каждого из пультов на неуправляемый в данный момент робот.

Для упрощения определения элементов конструкции, которые мешают выполнению технологических

операций, в программном комплексе реализована система оповещения о коллизиях (столкновениях) объектов. Так, при коллизии движущихся частей роботов с другими объектами на сцене и те и другие подсвечиваются красным цветом.

#### Моделирование аварийных ситуаций

В реальности многие блоки в шахте реактора являются дефектными в результате произошедших при эксплуатации аварийных ситуаций. Для отработки аварийных ситуаций в шахте реактора при извлечении дефектных блоков в программе предусмотрен механизм моделирования произвольных аварийных ситуаций, который позволяет отработать все возможные сценарии аварийных ситуаций и выработать план действий на случай их возникновения.

В программе моделируются следующие типы дефектных блоков кладки реактора: трещиноватые блоки и блоки, образовавшиеся при козловых авариях (слипание нескольких блоков).

Трещиноватый блок при попытке захвата его канговым захватом имеет вероятность треснуть, развалившись на несколько частей в зависимости от давления на него со стороны кангового захвата.

При козловых авариях происходит слипание нескольких соседних блоков в пределах одного или нескольких слоев в единый массив. Поскольку манипулятор робота имеет ограничение в грузоподъемности, то невозможно поднять достаточно крупный массив слипшихся блоков. В этом случае необходимо ударами насадок разбивать этот массив на массивы меньшего размера, которые уже можно поднять.

#### Графический интерфейс

На экране графического интерфейса расположены дополнительные элементы управления для работы с обрабатываемыми ситуациями.

На этом экране расположены элементы управления сценариями, камерами, аварийными состояниями блоков, комментариями, а также элементы отображения управляющих воздействий и извлеченных отходов.

Элемент управления сценариями предназначен для выбора начальных состояний кладки реактора при отработке технологических операций, а также сохранения отработанных последовательностей и сохранения новых сцен для последующей отработки технологических операций. В элементе управления отображается иерархическое дерево сохраненных сцен с дополнительной информацией о них и их запуском в режимах имитации и воспроизведения. По каждому сценарию приводится сводная информация — продолжительность сценария, число извлеченных блоков, изображение сцены с одной из камер и т. д.

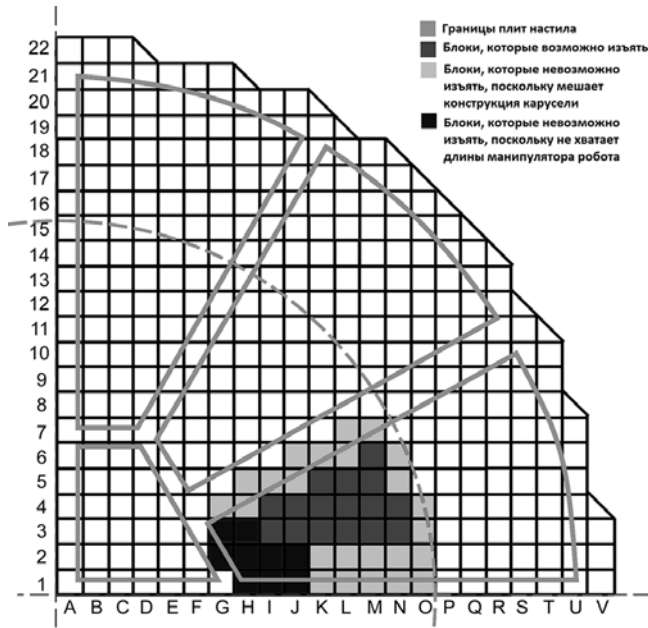


Рис. 3. Доступность блоков для извлечения

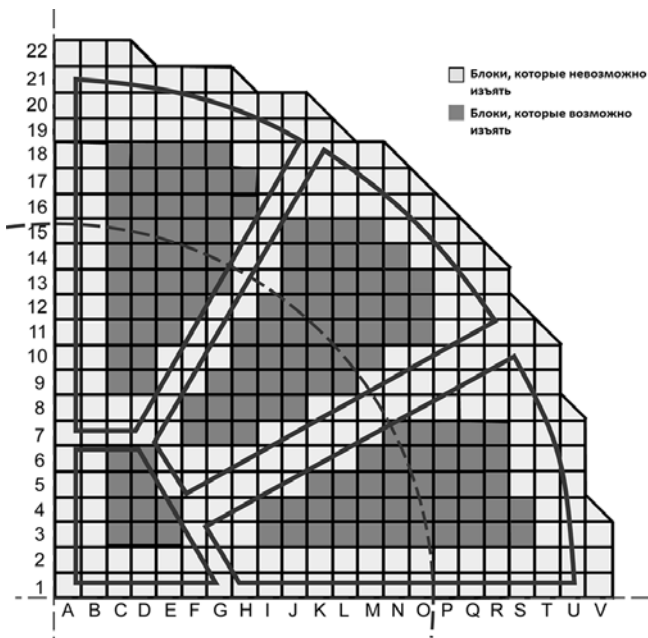


Рис. 4. Общая схема доступности блоков для изъятия

*Элемент управления камерами* предназначен для выбора камер, изображение с которых будет выводиться на экран трехмерной модели. Он позволяет разместить на экране трехмерной модели 1...4 выбранных камер.

*Элемент управления аварийными состояниями блоков* позволяет в режиме имитации, «на лету» изменять аварийные состояния блоков, делая их трещиноватыми, нормальными или создавая слипшиеся массивы блоков. В режиме воспроизведения данный элемент управления отображает динамику изменения состояния блоков без возможности их изменения.

*Элемент отображения управляющих воздействий* предназначен для наглядной демонстрации, какие управляющие воздействия реального пульта BROKK производятся в данный момент.

*Элемент управления комментариями* предназначен для добавления в процессе выполнения технологических операций дополнительных текстовых или звуковых комментариев, которые бы поясняли события, происходящие на трехмерной модели при анализе отработанных операций.

*Элемент отображения извлеченных отходов* отображает массу и объем извлеченных графитовых и металлических отходов, а также динамику их извлечения.

### Результаты верификации технологии демонтажа графитовой кладки

В процессе разработки и применения имитационной модели разборки кладки реактора Белоярской АЭС был обнаружен ряд проблем первоначальной версии технологии демонтажа блоков Белоярской АЭС, разработанной предварительно специализированной организацией.

#### Смена насадок

В первоначальной технологии предлагалось использование одного робота и установка на него с помощью средств автоматической смены насадок одной из необходимых в данный момент насадок.

В процессе моделирования данных операций было выявлено, что в рамках процессов, происходящих при демонтаже, невозможно осуществить автоматическую смену насадок. Эта операция требует точности расположения манипулятора робота относительно устанавливаемой насадки, которую невозможно обеспечить в условиях управления роботом BROKK на основе обзора рабочего пространства с телекамер. Кроме того, взвесь графитовой пыли, которая будет присутствовать в процессе демонтажа кладки, осядет на контактах устройства автоматической смены насадок, в результате чего будет невозможна смена насадок.

В результате была предложена модификация первоначального варианта технологии, предполагающая использование трех роботов, на которых сразу будут установлены нужные насадки, без необходимости их смены.

#### Сложность работы с неподвижными камерами

В процессе работы с имитационной моделью было выяснено, что набор неподвижных камер не позволяет организовать достаточный обзор для выполнения некоторых операций. В основном это касается процесса извлечения блоков из шахты. Из камер, расположенных на карусели, практически не видно ситуации под настилом. Камеры на насадках предоставляют приближенное изображение, которое не позволяет увидеть картину в целом. По этой причине в процессе работы с трехмерной моделью приходилось использовать в основном свободную камеру, которая не реализуема в рамках реального техпроцесса. Вследствие этого на основе анализа требуемых ракурсов камер пришлось переработать схему их расположения с помощью моделирования технологических операций на имитационной модели.

### **Низкий процент блоков, которые возможно извлечь с помощью предложенной технологии**

Некоторые блоки невозможно извлечь из кладки по одной из причин: мешает конструкция карусели; не хватает длины манипулятора робота.

Чтобы определить процент блоков, которые возможно изъять используя предложенную технологию, было проведено моделирование извлечения блоков кладки реактора в различных ситуациях и составлен технологический паспорт, в котором были рассмотрены различные варианты расстановок роботов при изъятии блоков под каждой плитой настила.

Для каждой плиты настила, под которой извлекаются блоки, для каждого варианта расстановки роботов была составлена схема, иллюстрирующая, какие из блоков можно захватить, а какие нельзя. На рис. 3 изображен пример такой схемы.

По результатам проверки технологии было выявлено, что для извлечения доступно около 30% блоков. Общая схема доступности блоков кладки реактора для извлечения представлена на рис. 4.

По данным результатам была предложена другая конструкция карусели, предполагающая монолитную круглую плиту с фиксированным на ней отверстием, простирающимся от центра плиты вдоль радиуса. Конструкция является поворотной — плита вместе со всем содержимым на ней может поворачиваться вокруг центральной оси.

Также в результате проведения исследований было выявлено, что при наличии в кладке козловых аварий со слипаниями трех и более блоков извлечение таких слипшихся кусков невозможно вследствие недостаточной грузоподъемности манипулятора робота BROKK.

В качестве решения предложено раскалывание образовавшихся агрегатов блоков, для чего следует

либо предусмотреть наличие дополнительного робота со специальной насадкой типа «отбойный молоток», либо обеспечить необходимую прочность насадки-захвата с тем, чтобы ее можно было использовать также и для расколов блоков нанесением по ним серии ударов этой насадкой.

### **Выводы**

С помощью имитационной модели было проведено моделирование первоначальной версии технологии разборки кладки реактора, и была проведена верификация первоначально разработанной технологии демонтажа графитовых блоков реактора АМБ-100 Белоярской. В результате верификации был выявлен ряд проблем данной технологии и предложены ее модификации для решения этих проблем, то есть имитационная модель позволила обнаружить недочеты ранее разработанного процесса демонтажа и предложить пути их устранения.

Проводимые в настоящее время работы по развитию имитационной модели позволят вывести ее на следующий технологический уровень, на котором будет возможно решение существенно большего спектра задач, возникающих в процессе вывода из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов других типов.

### **Список литературы**

1. Тихоновский В.Л., Былкин Б.К. Место и роль информационных технологий при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №4.
2. Былкин Б.К., Перегуда В.И., Шапошников В.А., Тихоновский В.Л. Состав и структура имитационных моделей для оценки затрат на вывод из эксплуатации блоков АЭС // Атомная энергия. 2011. Т. 110. Вып.2. февраль.

*Борис Константинович Былкин — д-р техн. наук, зав. лабораторией НИЦ «Курчатовский институт»,  
Виталий Владимирович Кононов — ген. директор, Владислав Леонидович Тихоновский — канд. техн. наук,  
директор департамента информационных технологий в энергетическом комплексе,  
Даниил Вадимович Чуйко — начальник отдела инновационных проектов,  
Павел Алексеевич Бунто — главный инженер проектов,  
Дмитрий Владимирович Свиридов — главный инженер проектов,  
Василий Евгеньевич Трифионов — главный специалист ЗАО «НЕОЛАНТ»,  
Контактный телефон (499) 999-00-00.*

### **Intel и КАМАЗ объявляют о сотрудничестве в области разработки и внедрения автомобильных информационно-развлекательных систем**

На пресс-конференции в рамках Петербургского международного экономического форума Intel и ОАО "КАМАЗ" объявили о сотрудничестве в области разработки и внедрения в производство интеллектуальной автомобильной системы на базе процессора Intel Atom. Первые рабочие образцы грузовой техники с такой системой будут продемонстрированы уже в сентябре на выставке «COMTRANS 2013».

Программно-аппаратное решение Intel (кодовое имя Russian Hill), локализованное для российского рынка, включает такие функции, как: навигация с актуальной информацией о загруженности транспортных сетей, радио, медиапроигрыватель, телефонное приложение, календарь, браузер, приложение для удобного общения в социальных сетях, а также голосовое управление и интеграцию с инфраструктурными сервисами. Платформа разрабатывалась с учетом требований автомобильной индустрии на базе ОС с открытым кодом, совместимой с ОС Tizen, которая принята в качестве стандарта альянсом автопроизводителей GENIVI.

В Intel уверены, что переход к массовому производству, применение стандартных комплектующих и ОС с открытым кодом сделают такие устройства привлекательными для российских автопроизводителей. Единообразие архитектуры платформ для дома, офиса и автомобиля позволит быстрее интегрировать компьютеры и приложения с автомобильными системами.

Разработка ПО является приоритетным направлением деятельности Intel в России. Ключевыми задачами в области информационных технологий являются высокопроизводительные вычисления, графика и коммуникационные технологии, включая разработку информационно-развлекательных систем для автомобилей. Для реализации данных проектов будут подключены более 700 инженеров-программистов научно-исследовательских центров Москвы, Нижнего Новгорода, Санкт-Петербурга и Новосибирска. Intel планирует активно привлекать российских инженеров к проектам мирового уровня, так как условия развития экономики в России однозначно диктуют необходимость технологических инноваций.

<http://www.intel.ru> и [www.kamaz.ru](http://www.kamaz.ru)