

**ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРАХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ****В. М. Дозорцев (Москва)**

Отмечаемый в последнее десятилетие бурный экономический рост обострил проблему подготовки операторов, поскольку собственники вновь строящихся и реконструируемых производственных мощностей не могут не задаваться вопросом, кто будет управлять их дорогостоящими технологическими установками [1], как в контексте ограниченных возможностей человека-оператора, так и с позиций промышленной безопасности и охраны окружающей среды. Так, по оценкам, полученным в работе [2] на основе мировой статистики аварий в нефтяной отрасли за 1965–95 гг., на каждую тонну сырой нефти только на стадии переработки приходилось более 10 центов прямых потерь от некачественного управления оперативным персоналом, что составляет для среднего по размерам нефтеперерабатывающего завода более 1,1 млн. дол. в год. Последние годы никак не снизили актуальность темы, особенно на фоне все удорожающегося производства и связанного с этим роста «цены» некачественного управления технологическими процессами (ТП). Достаточно в этой связи сослаться на свежий пример аварии на химическом предприятии в Тулузе 21 сентября 2001 г., унесшей жизни 29 чел. и обошедшейся в 2 млрд. дол. [3].

Общепризнанным средством преодоления такой негативной тенденции являются компьютерные тренажеры (КТ) для обучения операторов ТП. Мировой рынок продаж КТ для производств химико-технологического типа<sup>1</sup> оценивается в более чем 220 млн. дол. в год, причем более трети этих объемов приходится на Европу. На этом фоне доля российского рынка (3–4 млн. дол. в год) невелика, но с учетом всех сложностей переходного периода в российской экономике конца 90-х – начала 2000-х годов появление тренажерных продуктов (самого разного класса) примерно на сорока предприятиях отрасли дает обнадеживающую перспективу. По некоторым оценкам, мы стоим на пороге своеобразного тренажерного бума. Так, согласно авторитетнейшей аналитической и консалтинговой организации – ARC Advisory Group [4], при среднегодовом росте продаж КТ в мире в 8% в период 2007-2010 гг. наиболее существенный рост ожидается в регионах с интенсивным строительством и реконструкцией производства – в Китае, Индии и странах Восточной Европы, в частности, в России и других странах бывшего СССР.

Чего же вправе ожидать потенциальный пользователь от современных КТ? Прежде всего тренажеры должны обеспечивать углубленный тренинг операторов сложных ТП в управлении установками, давая практический опыт оперирования в разнообразных ситуациях, включая:

- нормальные технологические условия при различных производительностях установок и свойствах сырья;
- нарушения технологических режимов и сбои в работе оборудования;
- плановые и аварийные остановы;
- переходы на новые технологические режимы.

Согласно современным исследованиям [5], некачественное управление ТП вызвано ненадлежащим выполнением процедур управления (их неполнотой, неточностью или излишней сложностью), а также ошибочной уверенностью операторов в превосходстве собственных приемов управления перед предписываемыми. (Такая уверен-

<sup>1</sup> Традиционно помимо нефтепереработки к этому сегменту относят нефтехимию, химию, нефте- и газодобычу, целлюлозно-бумажную, горно-металлургическую, фармацевтическую и пищевую промышленность.

ность основана на опыте управления в нестандартных и аварийных ситуациях, часто фрагментарном и неоднозначном). КТ, с одной стороны, позволяют операторам вырабатывать навыки и практиковаться в правильных процедурах, а с другой – понять, как операторы выполняют процедуры, и тем самым совершенствовать их, например, разбивая на четкие последовательные этапы.

Известны также и побочные, хотя и немаловажные, цели, достигаемые с помощью КТ, такие, как:

- ознакомление операторов с работой системы управления;
- тестирование базы данных компьютеризированных систем управления;
- разработка и проверка новых стратегий управления (настройка новых контуров, верификация алгоритмов программно-логического управления, анализ устойчивости и эффективности многосвязного и усовершенствованного управления);
- технологический инжиниринг (разработка и обкатка новых технологических режимов, расшивка «узких мест») и пр.

При всей важности технических составляющих КТ (пользовательских интерфейсов участников тренинга, средств имитации элементов управления, систем автоматизированного инструктирования) очевидно, что эти цели недостижимы, если «сердце» КТ – тренажерные модели ТП – не будут адекватными актуальному состоянию реального ТП.

С математической точки зрения тренажерная модель (ТМ) дает яркий пример имитационной модели объекта со сложной нелинейной динамикой и ограничениями на входные и выходные переменные. В вычислительном плане речь идет о численном интегрировании (со скважностью 1–2 с) системы дифференциальных и конечных уравнений размерностью в несколько тысяч.

Основные характеристики ТМ, определяемые вышеуказанными требованиями к КТ, сводятся к следующим:

- ТМ основаны на фундаментальном моделировании процессов (кинетики, гидравлики, массо- и теплообмена и пр.);
- ТМ представляют собой системы «реального времени» в том современном понимании этого термина, что они предвиденным образом реагируют на заранее непредвиденные возмущения и управляющие воздействия<sup>2</sup>;
- ТМ должны быть точны, поскольку несоответствия в модели чреваты наиболее опасными последствиями в тренинге – так называемым «ложным» навыком, т. е. автоматизацией действий оператора на основе неверного отражения предметной области деятельности.

Проблема точности в компьютерном тренинге обычно вызывает наибольшие дискуссии. Какие же ТМ можно считать высокоточными и чем определяется их точность? Некоторые формальные подходы к анализу проблемы приведены в работе [6]; ниже кратко остановимся на содержательных моментах.

Сам термин «точность» предполагает наличие нескольких составляющих. Одна из них – *полнота* модели. Ясно, что включение в модель абсолютно всей технологической схемы, значительно удорожая тренажер и снижая скорость моделирования, может мало что добавлять к ее ценности для тренинга. Многие вспомогательные системы могут быть учтены в качестве граничных условий, при необходимости варьируемых инструктором. Технологические линии, не задействованные при нормальном функциони-

---

<sup>2</sup> Действительно, ТМ должна показывать адекватную динамическую реакцию на произвольную по времени и амплитуде последовательность вмешательств в моделируемый процесс даже за пределами технологического регламента. Часто именно возможность показать развитие ТП за штатными пределами и является главной целью разработки КТ.

ровании, пуске или останове, также могут не моделироваться. Резервное или параллельно работающее оборудование может моделироваться упрощенно, некоторые элементы оборудования могут при моделировании объединяться в «пакеты».

В то же время при всех упрощениях модели важно учитывать объем воспроизведения в тренажере системы противоаварийной защиты, для правильной работы которой необходимо обеспечить нужный объем моделирования переменных ТП. К тому же модель должна быть достаточно полной, чтобы были реализованы все технологические нарушения в работе оборудования и системы управления.

Еще одно требование к тренажерной модели – ее *связность*. Необходимо обеспечить расчет всей моделируемой технологической схемы, так чтобы изменения на любом ее участке отразились на всей схеме в соответствии с реальными физико-химическими процессами, протекающими в моделируемом объекте. Искусственная изолированность отдельных частей ТП, еще свойственная некоторым отечественным разработкам и являющаяся следствием объективной сложности реализации КТ, недопустима.

Наконец, важнейшее точностное требование – *адекватность* статического и динамического поведения модели реальному ТП. Мировая практика указывает в качестве достижимой цели точность в  $\pm 5\%$  для критических и  $\pm 10\%$  для некритических параметров в статических режимах при обеспечении ускорения моделирования в пределах от двух до пяти<sup>3</sup>. Адекватность КТ в переходных динамических режимах более трудна для проверки и, как правило, оценивается экспертно на качественном уровне. Необходимым условием адекватности является также *стабильность* модели, под которой понимается принадлежность параметров модели (как внешних, так и внутренних) заранее заданному рабочему диапазону, без срывов и сбоев в вычислении.

Залог выполнения высоких требования по адекватности – в наличии у разработчика высокоразвитых средств моделирования ТП, основанных на проверенных методах фундаментального моделирования физико-химических процессов и надежных базах физико-химических свойств веществ. Серьезные производители КТ обладают также высокоавтоматизированными средствами создания моделей, помимо прочего повышающими эффективность разработки за счет перенесения основной части работ в область конфигурирования моделей из базовых элементов.

Наконец, отметим еще один существенный компонент, обеспечивающий адекватность тренажерной модели – возможность получения эксклюзивных технологических данных (часто имеющих только у технологического лицензиара процесса), таких, как параметры катализаторов или кинетические параметры реакций в конверсионных процессах нефтепереработки. (В свою очередь, недоступность такой информации может влиять и на полноту моделирования.) Возникают также ситуации, когда для адекватного воспроизведения ТП требуется специальное программное обеспечение (как, например, для моделирования многофазных потоков). Такие программы обычно разрабатываются специализированными производителями и могут интегрироваться в состав КТ.

Будущее КТ обеспечено структурой современного химико-технологического производства, в котором производственные активы стоимостью в миллиарды долларов контролируются все меньшим по численности персоналом, действующим из удаленных операторных. В этих условиях все ужесточающиеся требования к адекватности пред-

---

<sup>3</sup> Сравнение с атомной энергетикой, где требования к КТ после известной аварии на Три Мэйл Айлэнд (США) гораздо жестче, и сам компьютерный тренинг строго предписан законодательно, дает  $\pm 2\%$  для критических и  $\pm 10\%$  для некритических параметров при ускорении до 10 раз (цит. по [7]).

ставления ТП позволяет говорить о переходе к использованию в КТ инжиниринговых моделей ТП, как о недалекой перспективе.

Под инжиниринговыми понимают высокоточные физико-химические модели, используемые для технологического инжиниринга ТП (в основном – для расчетов на стадии проектирования). Их прямое использование в КТ ограничивается на настоящий момент как техническими возможностями тренажеров (например, недостатком вычислительного ресурса для точного расчета модели в ускоренном масштабе времени), так и уровнем развития самих инжиниринговых моделей. (Хорошо проработанные для разнообразных переходных процессов, эти модели не всегда отвечают требованиям полноты и связности для конкретных технологических объектов.) Представляется, что в ближайшие годы теоретические и прикладные достижения в имитационном моделировании и доступность для КТ еще более мощных вычислительных ресурсов позволит отойти от упрощений в тренажерных моделях и использовать инжиниринговые модели напрямую.

### Литература

1. **Shanel A., Crabb C.** Who shall operate your plant?//Chemical Engineering. 1999. 106, No 2. P. 30–31.
2. **Дозорцев В. М., Шестаков Н. В.** Компьютерные тренажеры для производств химико-технологического типа: полезность, эффективность, окупаемость//Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. № 7. С. 24–39.
3. **Dechy N. et al.** First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster, 21st september 2001, AZF plant, France//Journal of Hazardous Materials. 2004. 111. P. 131–138.
4. Real-time Process Optimization and Training Worldwide Outlook. Market Analysis and Forecast through 2010 – ARC Advisory Group, 2006.
5. **Park J., Jung W.** The operators' non-compliance behavior to conduct emergency operating procedures—comparing with the work experience and the complexity of procedural steps//Reliability engineering and system safety. 2003. 82. P. 115–131.
6. **Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В., Левит М. Ю.** О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов//Труды междунар. конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)». М.: 2000. С. 51–61.
7. **Sheltout Z. et al.** Capture the long-term benefits of operator training simulators//Hydrocarbon Processing, 2007. 86, No 4. P. 111–116.