

УДК 66.011

СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОПТИМИЗАЦИИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Е.М. Юрьев, Е.Н. Ивашкина, Э.Д. Иванчина, А.В. Кравцов

Томский политехнический университет

E-mail: emyu@sibmail.com

С использованием стратегии системного подхода разработаны компьютерные моделирующие системы процессов нефтепереработки и нефтехимии. В основе каждой из систем лежит нестационарная математическая модель каталитического процесса, построенная с учетом реакционной способности углеводородов и обладающая в этой связи прогнозирующей способностью. Разработана производственно-фреймовая модель процессов синтеза линейных алкилбензолов для определения причин возникновения аварийных ситуаций в аппаратах, входящих в технологическую схему установки. Модель описывает пользователю действия персонала по устранению аварийной ситуации. Проведена адаптация программных продуктов на реальном промышленном объекте посредством разработки модуля связи с единой тематической витриной данных завода.

Современное состояние химической и нефтеперерабатывающей промышленности характеризуется потребностью в постоянном повышении эффективности производств, что, в свою очередь, предъявляет большие требования к средствам автоматизации, контроля и управления различного уровня. Это касается как систем автоматизированного управления параметрами технологических процессов, так и информационных технологий, призванных прогнозировать производительность установок и качество товарных продуктов. Программное обеспечение зарубежных производителей предназначено, в основном, для процессов подготовки и транспорта нефти и газа и, как правило, не пригодно для расчетов реакторных процессов каталитической переработки углеводородов. Существуют и отечественные разработки, так, модели виртуальных анализаторов показателей качества продукции состоят из большого количества систем многомерных регрессионных уравнений и алгоритмов оценки точности прогнозирования. Они предназначены решать проблемы сбора, архивирования и структурирования информации локальными базами данных и системами управления базами данных, такими, как, например, «Единая тематическая витрина данных» (ЕТВД) на ООО «КИНЕФ» [1, 2].

Технологические моделирующие системы для процессов нефтепереработки и нефтехимии, разрабатываемые на кафедре химической технологии топлива ТПУ, имеют отличительные свойства, позволяющие более эффективно решать задачи мониторинга и оптимизации нефтеперерабатывающих заводов. Инновационность метода заключается в учете реакционной способности углеводородов многокомпонентного сырья, потенциала катализатора и нестационарности протекания реакций на поверхности катализатора. Такой подход позволяет совершенствовать технологии, оценивать состояния катализаторов, оптимизировать процессы, осуществлять мониторинг и прогнозирование производств. При внедрении таких систем на производство встает задача синтеза их с автоматической системой управления технологическими процессами (АСУТП) завода.

Создание ЕТВД в 1999 г. из двух подсистем автоматизации предприятия — автоматической системы управления производством (АСУП) и АСУТП решило проблемы сбора, архивирования, структурирования информации и предоставления ее пользователям. ЕТВД представляет собой созданный на архитектуре СУБД Microsoft SQL Server, программный комплекс, объединяющий АСУТП верхнего и нижнего уровней в единое информационное пространство. ЕТВД включает в себя большое количество распределенных систем управления и коммуникационные серверы, выполняющие функции передачи технологической информации между уровнями. Сервер сбора технологической информации позволяет хранить большие массивы данных о технологическом процессе. Пользователи имеют доступ как к архивной информации на сервере, так и к информации реального времени на коммуникационных серверах.

Однако, предоставление только технологической информации создает не полную картину работы предприятия. Необходимо коррелировать эти данные с другими показателями, поэтому следующим закономерным шагом в развитии АСУТП на нефтеперерабатывающих заводах выступает аналитическая обработка полученных данных.

В частности, возникла объективная необходимость слияния ЕТВД и пакетов прикладных программ для расчета производственных процессов на ООО «КИНЕФ».

Первыми прикладными программами, позволяющими использовать массивы информации из технологического мониторинга ЕТВД при анализе и прогнозировании производства, являются технологические моделирующие системы, разработанные на кафедре химической технологии топлива ТПУ для таких процессов, как каталитический риформинг, изомеризация, дегидрирование высших n-парафинов (Пакол), гидрирование высших диолефинов (Дифайн), алкилирование бензола.

При создании математической модели каждый из этих процессов рассматривается как единая химико-технологическая система (ХТС). В то же время в этой системе выделялись следующие уровни иерархии.

- Микроуровень – молекулярный уровень элементарного процесса.
- Макроуровень – физико-химическая система – представляет собой секцию аппарата или отдельный аппарат.
- Уровень химического производства – ХТС – представляет собой совокупность аппаратов, связанных между собой потоками.
- Уровень предприятия – это несколько производств, составляющих предприятие.
- Уровень компании или объединения – это несколько предприятий, объединённых в компанию.

При разработке моделирующей системы возникает необходимость синтеза математического описания ХТС. Сущность иерархического принципа синтеза математического описания заключается в том, что математическое описание каждого последующего структурного уровня должно включаться в качестве основной части в математическое описание последнего уровня.

Так, математическая модель процесса дегидрирования высших n -парафинов представляет собой систему дифференциальных уравнений [3]:

$$G \frac{\partial C_i}{\partial z} + G \frac{\partial C_i}{\partial V} = (1 - \varepsilon) \sum_{j=1}^N r_j, \quad i = 1 \dots M, \quad j = 1 \dots N,$$

где G – часовой расход сырья, $\text{м}^3/\text{ч}$; C_i – концентрация i -го углеводорода, $\text{моль}/\text{м}^3$; V – объем катали-

затора, м^3 ; ε – порозность слоя катализатора, $\varepsilon = 0 \dots 1$; r_j – скорость j -й реакции, $\text{моль}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$; z – «приведенное время» или суммарный объем переработанного сырья после регенерации катализатора, м^3 , $z = Gt$; t – время, ч ; M – количество компонентов; N – количество реакций.

Уравнение теплового баланса реактора в дифференциальной форме запишется как [3]:

$$G \frac{\partial T}{\partial z} + G \frac{\partial T}{\partial V} = -(1 - \varepsilon) \frac{\sum_{j=1}^N (\Delta H_j r_j)}{c_p}.$$

где T – температура процесса, K ; ΔH_j – тепловой эффект реакции, $\text{Дж}/\text{моль}$; c_p – теплоемкость смеси, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$.

Начальные и граничные условия:

$$z = 0: C_i = 0, T = T_{\text{нач}};$$

$$V = 0: C_i = C_{i,\text{вх}}, T = T_{\text{вх}}.$$

Таким образом, размерность системы уравнений математической модели совпадает с количеством веществ, концентрация которых определяется в расчетах, плюс одно уравнение для определения профиля температуры по реактору. Результатом решения системы будет матрица потоков. Она представляет собой таблицу, содержащую, например, выходные концентрации потоков на определенную дату расчета, рис. 1.

№	Компонент(масс. %)/показатель	26.09.2007	29.09.2007	02.10.2007	05.10.2007	07.10.2007	10.10.2007	13.10.2007	16.10.2007	18.10.2007	21.10.2007	24.10.2007	27.10.2007
1	Парафины общие (после Пакол)	83,31	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,31	83,31	83,31	83,3	83,3	83,3
2	Парафины общие (после Дифайн)	83,56	83,55	83,55	83,55	83,55	83,55	83,56	83,56	83,56	83,55	83,55	83,5
3	Олефины общие (после Пакол)	11,99	12	12	12	12	12	11,99	11,99	11,99	12	12	11,9
4	Олефины общие (после Дифайн)	11,78	11,79	11,79	11,79	11,78	11,78	11,78	11,78	11,78	11,78	11,78	11,7
5	Диолефины общие (после Пакол)	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,9
6	Диолефины общие (после Дифайн)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,9
7	Изопарафины общие (после Пакол)	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,7
8	Изопарафины общие (после Дифайн)	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,7
9	Изонепредельные (после Пакол)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,4
10	Изонепредельные (после Дифайн)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,4
11	Ароматика (после Пакол)	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,5
12	Ароматика (после Дифайн)	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,4
13	Водород в ВСГ (после Пакол)	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2
14	УВ газы в ВСГ (после Пакол)	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
15	Содержание кокса на катре дегидр., %	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
16	Входная температура (p-p Пакол)	480,1	480,1	480,1	480,1	480,1	480,2	480,2	480,2	480,2	480,3	480,4	480
17	Выходная температура (p-p Пакол)	454,2	454,2	454,2	454,2	454,2	454,2	454,3	454,3	454,3	454,4	454,5	454
18	Входная температура (p-p Дифайн)	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180
19	Выходная температура (p-p Дифайн)	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180
20	Активность (p-p Пакол)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	Парафин C9 (после Пакол)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0
22	Парафин C10 (после Пакол)	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,6
23	Парафин C11 (после Пакол)	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,03	25,04	25,04	25,03	25,03	25,0
24	Парафин C12 (после Пакол)	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,67	28,6
25	Парафин C13 (после Пакол)	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83	17,8
26	Парафин C14 (после Пакол)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
27	Парафин C9 (после Дифайн)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0
28	Парафин C10 (после Дифайн)	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,69	11,6
29	Парафин C11 (после Дифайн)	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,11	25,1
30	Парафин C12 (после Дифайн)	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,76	28,7

Рис. 1. Пример матрицы потоков – результат моделирующего расчета

Выполненный с использованием технологической моделирующей системы мониторинг работы промышленной установки «Пакол-Дифайн» показал, что в период работы установки с 15.09.2007 по 13.03.2008 в реакторе дегидрирования наблюдался плавный подъем температуры входного потока с 469 до 477 °С, рис. 2. При этом наблюдались небольшие перепады температуры в период с 30.09.2007 по 10.10.2007 и с 21.02.2008 по 24.02.2008, обусловленные изменением нагрузки сырья. Концентрация кокса на 13.03.2008 г. составила 1,3 мас. %, рис. 3. Если учесть, что на катализаторе данной марки при эксплуатации отлагалось не более 3 мас. % кокса, то можно считать, что текущий цикл работы катализатора близится к своему завершению. Об этом свидетельствует также высокое содержание диолефинов в продуктах реактора дегидрирования – ок. 0,8 мас. %, рис. 4.

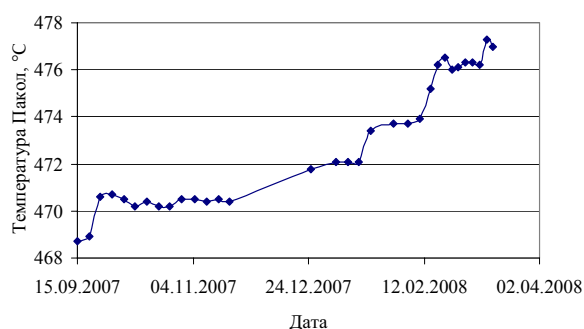


Рис. 2. Темп подъема температуры в реакторе дегидрирования

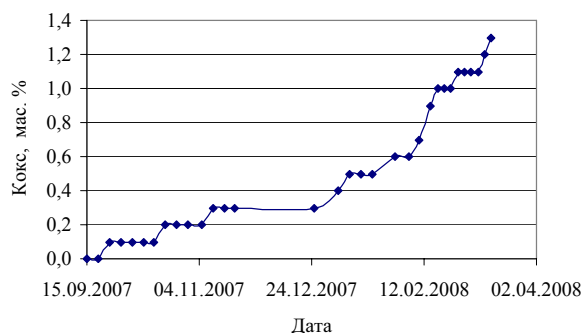


Рис. 3. Динамика накопления кокса на катализаторе дегидрирования

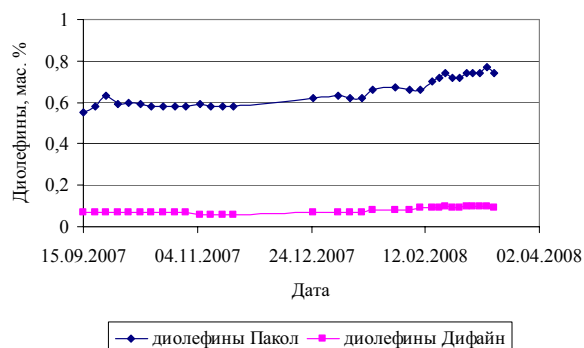


Рис. 4. Концентрация диолефинов в продуктах установки «Пакол-Дифайн»

Исследования показали, что системный подход в целом и принцип декомпозиции в частности

очень удобны не только при составлении моделей ХТС определенного уровня иерархии, но и при создании компьютерных моделирующих систем (КМС) в средах разработки компьютерных приложений, например, семейства «Borland Delphi». В этом случае моделирующий алгоритм каждого аппарата локализуется внутри отдельного модуля, входящего в Delphi-проект разрабатываемого приложения, а КМС представляет собой совокупность таких модулей, дополненных описанием интерфейса программы, численными базами данных, а также модулями-контейнерами, хранилищами различных элементов синтаксиса языка программирования, таких как подпрограммы и типы переменных (методы и классы). Такой подход при создании прикладных компьютерных моделирующих приложений позволяет разработчику эффективно использовать параметры моделей, характеристики входных и выходных потоков, оперативно изменять связи между частями программы, эффективно диагностировать ошибки в работе программы и т. д.

Схема взаимодействия отдельного модуля программы «PDA» моделирования процессов синтеза линейных алкилбензолов приведена на рис. 5. Она представлена в соответствии с отмеченными принципами компьютерного моделирования. Пользователь КМС взаимодействует с программой через интерфейс (простые окна, диалоговые окна и др.), вводит данные, выбирает тип расчета. При работе программы реализуется моделирующий алгоритм решения уравнений математической модели реакторного процесса, который представляет собой комбинацию известных алгоритмов (в простейшем случае – один алгоритм) вычислительной математики. Различные численные характеристики процессов (термодинамические, теплофизические параметры), которые представляют собой в большинстве случаев параметры моделей, извлекаются из баз данных, сформированных ранее. Сопровождение и модернизацию модулей программ осуществляют разработчики, опираясь на собственные знания и сформированные ранее базы знаний по реакторным процессам, характерным для отдельной установки.

КМС реализуются в виде Windows-приложений, рис. 6.

В моделирующей системе для процессов синтеза линейных алкилбензолов реализована продукционно-фреймовая модель для определения причин возникновения аварийных ситуаций в аппаратах, входящих в технологическую схему установки. Также модель демонстрирует действия персонала по устранению данной аварийной ситуации. Пользователь выбирает аппарат, где возникла аварийная ситуация, затем выбирает аварийную ситуацию. После выбора ситуации появляется список возможных причин ее возникновения и порядок действия персонала по ее устранению, рис. 7.

Одним из важнейших вопросов, касающихся дальнейшего сопровождения программных продуктов на ООО «КИНЕФ» стала адаптация моделирующих систем с ЕТВД. Для этого формируется так



Модуль технологической моделирующей системы

Рис. 5. Схема взаимодействия модуля КМС с пользователями

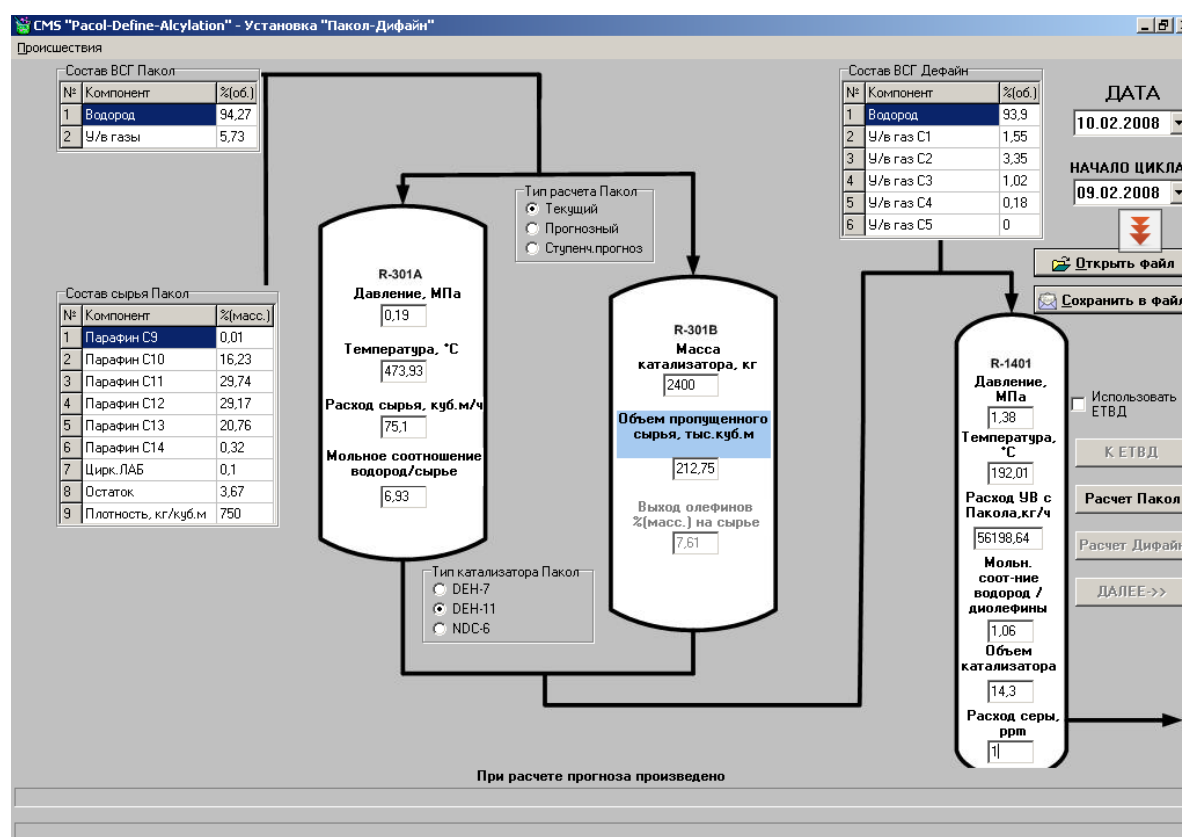


Рис. 6. Моделирующая система процессов синтеза линейных алкилбензолов

называемый файл инициализации приложения «Модуль связи с общезаводской базой данных». Этот модуль предназначен для передачи данных из ЕТВД в программы, описывающие технологиче-

ские процессы. Такая программа была разработана при сотрудничестве кафедры ХТТ ТПУ и «ПО «Киришинефтеоргсинтез». Схема взаимодействия прикладной программы с ЕТВД представлена на рис. 8.



Рис. 7. Продукционно-фреймовая модель для определения аварийных ситуаций

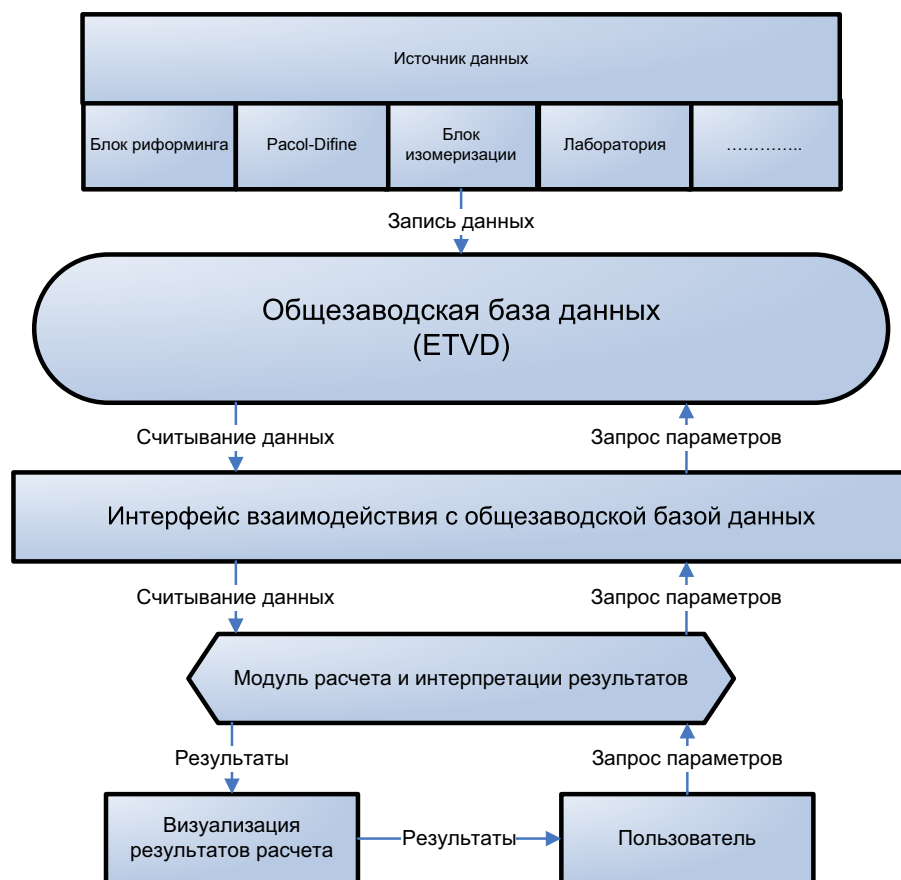


Рис. 8. Схема взаимодействия КМС с ЕТВД посредством «модуля связи»

Модуль разработан таким образом, что его внутренние процедуры при небольшом изменении файла инициализации датчиков способны осуществлять выборку данных с любых установок производства.

Файл представляет собой массив записей, включающих следующие поля: *[название технологического параметра, которое измеряет датчик, с указанием аппарата в котором происходит измерение]*, *[id номер – порядковый номер записи, уникальный в рамках данного файла инициализации]*, *[номер датчика в общезаводской классификации датчиков]*.

Пример записи для реактора процесса дегидрирования н-парафинов:

[Температура входа R-301A, °C]

[id_1=2]

[in_idf_2=9999]

Для моделирующих программ дальнейшим шагом в этом аспекте совершенствования является создание и подключение нового Delphi-модуля в Delphi-проект, который, взаимодействуя с ЕТВД посредством процедур, описанных в приложении «Модуль связи», осуществлял бы импорт данных из общезаводской витрины в компьютерную систему. При исследовании структуры синтаксиса «Модуля связи» была разработана методика создания в среде «Delphi 7» модуля импорта информации из ЕТВД и внедрения в КМС процедуры передачи информации из ЕТВД. Схема взаимодействия модулей, написанных в Delphi-проекте КМС, приведена на рис. 9.

Основным достоинством КМС, является проведение оптимизационных и прогнозных расчетов, в том числе и на предмет различных финансовых показателей. Так, расчеты процесса гидрирования диолефинов на установке «Дифайн» ООО «КИ-НЕФ», показали, что оптимальный расход селективного яда, диметилдисульфида, позволяет увеличить выход целевого продукта, линейного алкилбензола, может быть увеличен на 2,0...14,0 %, что в пересчете составляет ок. 45–315 млн р./год дополнительного дохода, практически, без увеличения затрат на других этапах данного производства, рис. 10.

Таким образом, разработанные на кафедре химической технологии топлива ТПУ моделирующие комплексы для процессов нефтепереработки и нефтехимии представляют собой программные продукты, имеющие большое прикладное значение и обеспечивающие своевременный мониторинг, точные прогнозирующие и оптимизационные расчеты, в том числе и по экономическим критериям. Многолетний опыт создания моделей и взаимодействия с технологическим персоналом заводов показал, что высокая эффективность таких систем достигается за счет использования разработанной методики, включающей в себя этапы учета в моделях компонентного состава углеводородного сырья и детального механизма превращения веществ на поверхности катализатора. Разработанная моделирующая система процессов синтеза алкилбензолов включает в себя модуль диагностики причин отклонения в работе промышленной установки и может быть использована для организации

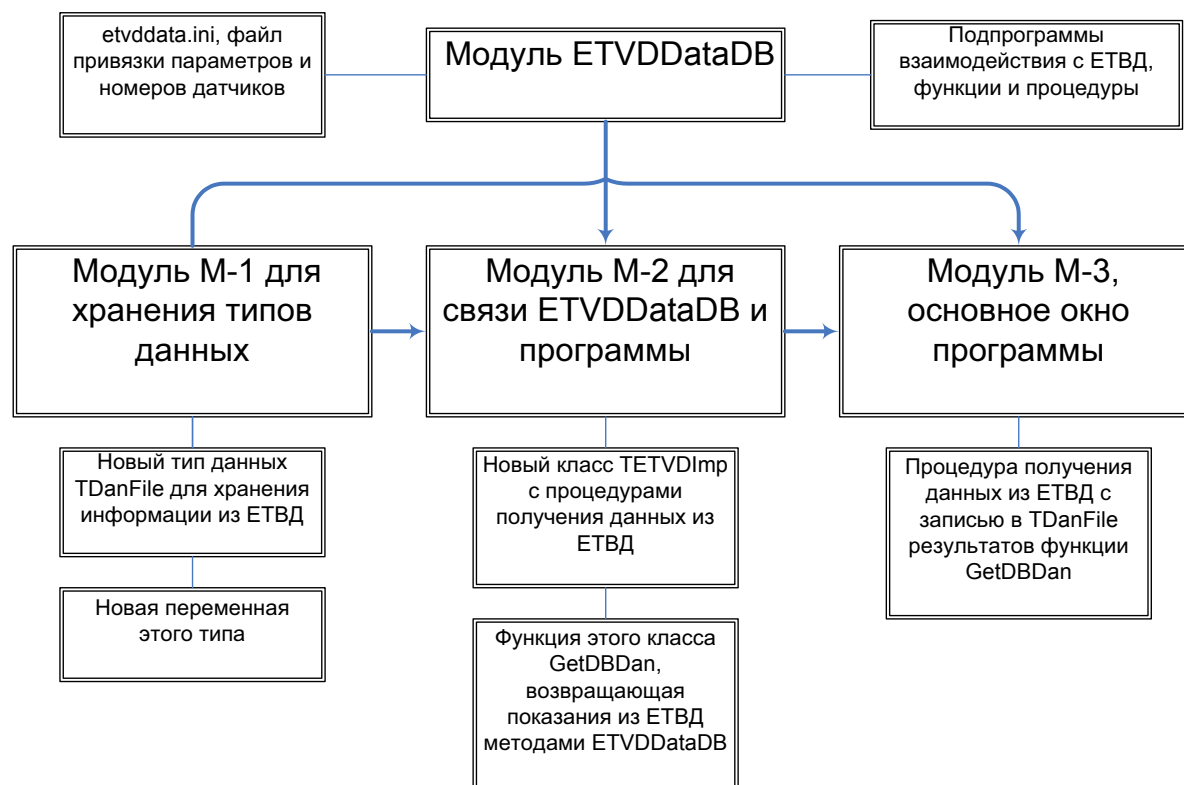


Рис. 9. Принцип создания модуля импорта из ЕТВД в Delphi-проекте

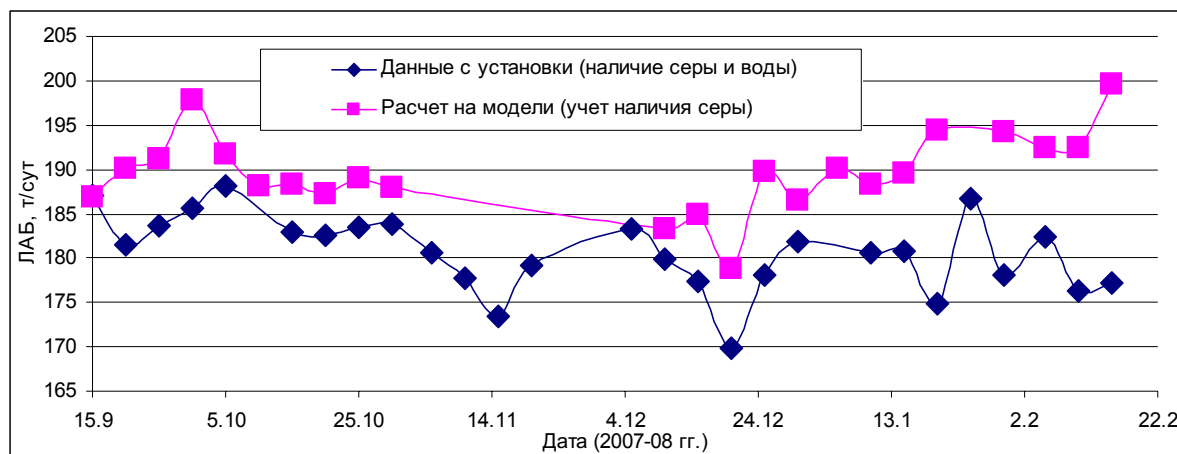


Рис. 10. Определение оптимального режима осернения на модели

действий персонала при возникновении аварийных ситуаций в аппаратах, входящих в технологическую схему установки. При внедрении таких систем на другие нефтеперерабатывающие заводы

России естественным этапом станет их адаптация к действующим на них базам данных технологических параметров и дальнейшее сопровождение разработанных программных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершберг А.Ф., Безручко О.А. Автоматизация производства ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез». Применение современных информационных технологий // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – № 2. – С. 45–49.
2. Подъяпольский С.В., Афонин Д.В. Современные средства, системы, комплексные подходы и решения в автоматизации технологических процессов // Топливо-энергетический комплекс России: Сб. матер. 6-го Междунар. форума, 2006. – СПб., 2006. – Т. 1. – С. 134–135.
3. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Михайлова Е.Н., Мельник Д.И. Построение нестационарной кинетической модели процесса

дегидрирования н-парафинов с учетом коксообразования на поверхности катализатора // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 116–118.

Поступила 08.04.2008 г.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, химико-технологическая система, программа, реактор, катализатор, модуль, линейный алкилбензол.