

**С.С. Власов, А.Г. Шумихин**

Пермский государственный технический университет

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ КОЛОННЫ  
К-1 УСТАНОВКИ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЙ ПЕРЕГОНКИ  
НЕФТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА БЕНЗИНА**

*Предложен, разработан и исследован алгоритм управления технологическим процессом колонны К-1 промышленной установки атмосферно-вакуумной перегонки на основе математической модели прогнозирования качества бензина в статических режимах.*

В работах [1] и [2] рассмотрены математическая модель прогнозирования показателя качества бензина К-1 – температуры конца кипения (ТКК) бензина К-1 установки атмосферно-вакуумной перегонки АВТ-1 ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» (далее АВТ) и алгоритм ее адаптации.

Разработанная математическая модель для прогнозирования ТКК бензина К-1 основана на математическом аппарате множественной линейной регрессии вида

$$y = \sum_{i=0}^N a_i \cdot x_i = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}, \quad (1)$$

где  $y$  – моделируемый показатель качества;  $a_i$  – коэффициенты регрессии;  $x_i$  – значения переменных в регрессионной зависимости ( $x_0 = 1$ );  $\mathbf{A}$  – вектор-строка коэффициентов регрессии;  $\mathbf{X}$  – вектор-столбец значений переменных регрессии.

Статистически выявлена связь между ТКК и множеством переменных технологического процесса (ТП). В принятых в [1] и [2] обозначениях переменных разработанная математическая модель виртуального анализатора (ВА) ТКК бензина К-1 примет следующий вид:

$$\begin{aligned} FBP = 148,1929 - 0,6101 \cdot t1014 - 0,2446 \cdot t1015 + \\ + 0,7599 \cdot t1013 - 8,2814 \cdot FlegNum - 45,05 \cdot FbnzDivMoil, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $FBP$  – ТКК бензина К-1;  $t1014$  – температура нефти на входе в колонну К-1;  $t1015$  – температура низа колонны К-1;  $t1013$  – температура верха колоны К-1;  $FlegNum$  – флегмовое число;  $FbnzDivMoil$  – отношение объемного расхода бензина К-1 к массовому расходу нефти.

Для управления показателем качества ТКК доступен и практически используется только один технологический параметр  $t1013$  – температура верха колонны К-1. Данный параметр непосредственно входит в регрессионную модель, что позволяет определять значение управляющего воздействия обратным счетом по модели, исходя из заданного значения показателя качества по формуле:

$$x_k = (y_{\text{зад}} - \sum_{i=0}^N a_i \cdot x_i | i \neq k) / a_k, \quad (3)$$

где  $y_{\text{зад}}$  – заданное значение показателя качества;  $x_k$  – значение управляющей переменной в регрессионной модели,  $x_k = t1013$ .

Расчет значения управляющего воздействия в соответствии с формулой (3) обладает существенным недостатком. В алгоритме отсутствует обратная связь по действительному (измеренному) значению показателя качества, а с учетом того, что модель носит статистический характер и, кроме того, не учитывает множество возмущений, действующих на технологический процесс, практическая реализация такого подхода проблематична. Однако если переформулировать (3) и ввести обратную связь по прогнозируемому параметру, то (3) примет следующий вид:

$$\Delta x_k = (y_{\text{зад}} - \sum_{i=0}^N a_i \cdot x_i) / a_k, \quad (4)$$

где  $\Delta x_k$  – изменение управляющей переменной, необходимое для устранения рассогласования между заданным и текущим прогнозируемыми значениями показателя качества.

Для оценки работоспособности предлагаемого алгоритма расчета управляющего воздействия в среде визуального моделирования Simulink пакета MatLab разработана схема моделирования, имеющая вид, представленный на рис. 1.

На представленной схеме объект управления моделируется линейной регрессией вида (2). В модель алгоритма управления введен нелинейный элемент «зона нечувствительности» по каналу задания

(ошибки) регулирования ТКК, имеющая диапазон, равный  $-1..1$ , что обусловлено статистической природой моделирования показателя и, следовательно, его задание в виде детерминированной точной величины является нецелесообразным. На выходе алгоритма управления установлен элемент типа «насыщение», который ограничивает приращение управляющей переменной на каждом шаге управления. Цифровой интегратор ограничивает абсолютные значения управляющей величины в пределах регламентных норм.

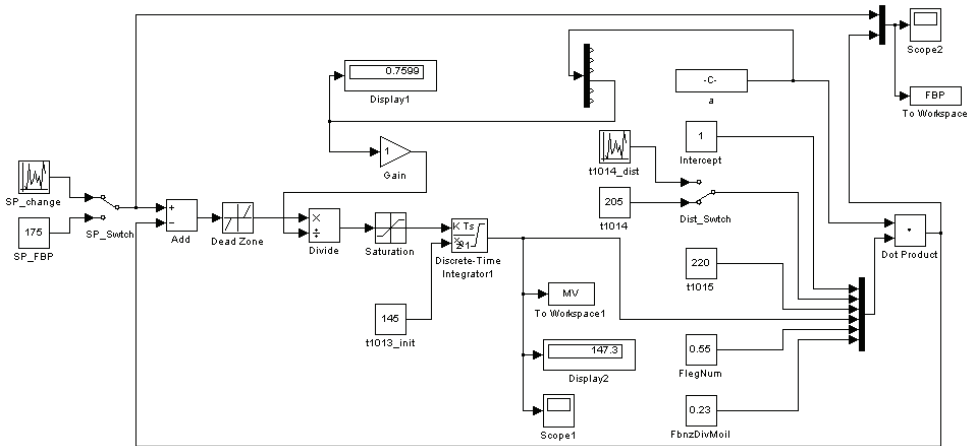


Рис. 1. Схема моделирования алгоритма управления ТКК бензина К-1

На разработанной схеме моделирования с целью исследования качества алгоритма управления при отработке возмущений и изменения задания проведен вычислительный эксперимент.

При исследовании реакции на изменение задания каждый 15-й такт управления случайным образом менялось равномерно распределенное на интервале  $[168;175]$  значение задания на ТКК бензина К-1. Всего в результате эксперимента исследована реакция системы на 100 изменений случайным образом задания.

Для оценки качества алгоритма управления при отработке изменения задания использовались следующие критерии (показатели): дисперсионное отношение  $F$  (критерий Фишера), коэффициент корреляции  $R$  между выборочными и расчетными значениями показателя качества, средняя ошибка  $\bar{\Delta}$  прогнозирования показателя качества, максимальное значение абсолютной ошибки  $|\Delta|_{\max}$  прогнозирования показателя качества, вычисляемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
F &= \frac{S_{\text{полн}}^2}{S_{\text{ост}}^2}; S_{\text{полн}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{э}} - \bar{y})^2}{N-1}; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i^{\text{э}}}{N}; S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{э}} - \hat{y}_i)^2}{N-l}; \\
R &= \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{э}} - \bar{y})^2 \cdot (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}{(N-1) \cdot S^{\text{э}} \cdot S^{\wedge}}; \bar{\hat{y}} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i}{N}; \bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\text{э}} - \hat{y}_i)}{N}; \\
|\Delta|_{\text{max}} &= \max_{i=1, N} |y_i^{\text{э}} - \hat{y}_i| \quad (5)
\end{aligned}$$

где  $S_{\text{полн}}^2$  – выборочная дисперсия;  $S_{\text{ост}}^2$  – оценка остаточной дисперсии;  $y_i^{\text{э}}$  – экспериментальное значение показателя качества;  $\bar{y}$  – среднее выборочное значение показателя качества;  $\hat{y}_i$  – расчетное по модели значение показателя качества;  $N$  – объем соответствующей выборки (обучающей, тестовой);  $l$  – число параметров уравнения регрессии;  $\bar{\hat{y}}$  – среднее расчетное значение показателя качества;  $S^{\text{э}}$  – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) выборочных значений;  $S^{\wedge}$  – оценка СКО значений, рассчитанных по модели.

При обработке системой изменения задания были получены следующие значения оценок качества алгоритма управления в вычислительном эксперименте:  $F = 2,6656$ ;  $R = 0,7989$ ;  $\bar{\Delta} = -0,0220$ ;  $|\Delta|_{\text{max}} = 5,24$ . Значения критериев свидетельствуют об удовлетворительном качестве алгоритма при обработке изменения задания.

При исследовании процесса компенсации алгоритмом управления возмущающих воздействий на имитационную модель объекта каждый 15-й такт управления подавалось сформированное случайным образом нормально распределенное возмущающее воздействие. В качестве такого возмущения выбрана температура нефти на входе в колонну К-1. Для оценки реакции алгоритма на возмущающие воздействия были проведены вычислительные эксперименты по двум схемам. В первом эксперименте алгоритм управления был выключен из контура управления, во втором – включен при убранной из канала задания (ошибки) зоне нечувствительности. Оценка реакции алгоритма управления на возмущающее воздействие осуществлялась по следующему критерию:

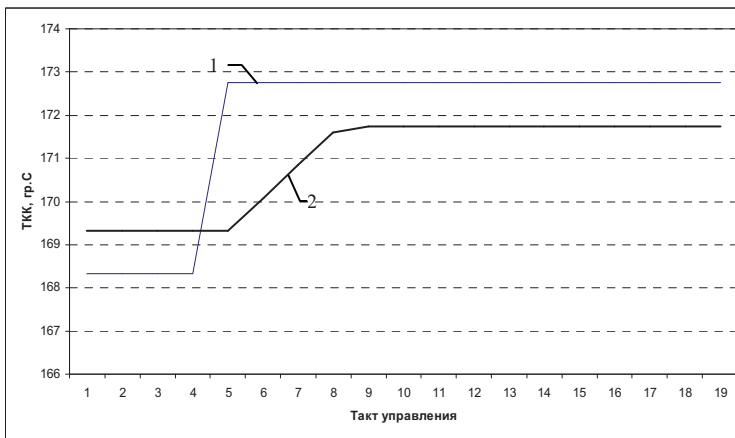
$$Cr = \frac{S_0}{S_1}, \quad (6)$$

где  $S_0$  – СКО показателя качества без алгоритма управления;  $S_1$  – СКО показателя качества с алгоритмом управления.

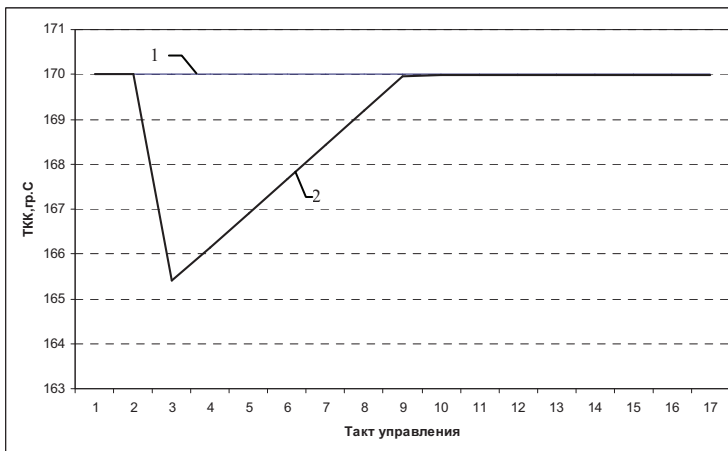
Предложенный критерий оценивает, насколько снижается СКО показателя качества при включении в работу алгоритма управления. Его значение, найденное по результатам вычислительного эксперимента при  $S_0 = 1,8302$  и  $S_1 = 1,0680$ , составило 1,7137.

Таким образом, алгоритм управления обеспечивает снижение СКО ТКК бензина К-1 более чем в 1,5 раза, что характеризует работу алгоритма управления при компенсации возмущения как удовлетворительную.

На рис. 2 приведен пример моделирования реакции объекта на возмущение и изменение задания.



а



б

Рис. 2. Пример реакции имитационной модели: а – на изменение задания, б – на возмущение: 1 – заданное значение ТКК; 2 – значения выхода виртуального анализатора ТКК

В полученной по экспериментальным данным модели виртуального анализатора ТКК бензина К-1 (2) присутствуют входные переменные, коррелированные с управляющей переменной. Это приводит к тому, что коэффициент при управляющей переменной не отражает действительный вклад управляющей переменной в значение показателя качества. В этом случае рассчитанное по такой модели значение управляющего воздействия содержит ошибку. Поэтому для целей управления целесообразно использовать модель, содержащую только некоррелированные переменные. Тогда несмешанный коэффициент при управляющей переменной будет корректно отражать степень ее влияния на прогнозируемую величину. Такими переменными по определению являются независимые управляющие переменные ТП. В случае линейной регрессии и ортогональности переменных достаточно построения регрессии только от одной управляющей переменной. Коэффициент наклона этой зависимости будет статистически достоверно отражать влияние данной управляющей переменной на показатель качества и может использоваться для целей управления. Тогда модель управления для показателя ТКК будет следующей:

$$FBP = a_0 + a_1 \cdot t1013. \quad (7)$$

Для подтверждения предположения о достаточности для управления показателем ТКК модели (7) проведен вычислительный эксперимент на математической модели технологического процесса, разработанной в программном пакете моделирования химико-технологических процессов Honeywell UNISIM Design, адаптированной к режиму процесса. Путем независимого варьирования управляющих переменных и возмущений ТП сформирована выборка из 100 реализаций. Каждая реализация вектора управляющих переменных и возмущений подавалась на вход математической модели процесса, и рассчитывался его статический режим, в том числе и эталонное значение ТКК бензина К-1. На основе сформированной выборки проведен регрессионный анализ. При этом структурно модель соответствовала уравнению (2). Получен коэффициент при управляющей переменной  $t1013$ , равный 1,2902. При построении регрессионной модели показателя качества как функции только от независимых (ортогональных) управляющих переменных и возмущений коэффициент в регрессии при управляющей переменной  $t1013$  был равен 1,5904. На третьем этапе была построена регрессия от одной переменной  $t1013$  с коэф-

фициентом, равным 1,6164. Разница в значениях коэффициента для последних двух вариантов статистически незначима, что подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности построения модели для целей управления только от одной управляющей переменной. Предположение о том, что если в модели присутствуют переменные, коррелированные с управляющей, то коэффициент при ней некорректно отражает ее влияние на показатель качества, также находит свое подтверждение в результатах моделирования.

На модели ТП проведен также эксперимент, в ходе которого из всего набора управляющих переменных и возмущений ТП варьировалась случайным образом по нормально распределенному закону только управляющая переменная  $t1013$  с СКО, соответствующим режиму реального ТП. По реализациям сформированной таким образом выборки проведен регрессионный анализ зависимости ТКК бензина К-1 от температуры верха колонны К-1  $t1013$  и получено значение коэффициента наклона регрессионной зависимости, равное 1,5275, которое значимо отличается от рассчитанных ранее значений.

Подобное отличие можно объяснить тем, что управляющие переменные и возмущения ТП не являются независимыми, а связаны между собой нелинейными зависимостями. Например, если считать, что на верхней тарелке колонны К-1 жидкость и пары находятся в состоянии термодинамического равновесия, то давление в колонне, температура и состав отбираемого бензина имеют функциональную нелинейную термодинамическую связь. Это, в свою очередь, означает, что для адекватного описания этих зависимостей в окрестности рабочего режима линейные модели прогнозирования и управления должны быть адаптивными, отслеживающими возмущения в ТП, в том числе и неконтролируемые, и присущую ТП нелинейность.

Для комплексной оценки работоспособности и эффективности предлагаемого алгоритма управления, алгоритмов адаптации модели управления и прогнозирования разработана модель для проведения вычислительного эксперимента по управлению ТП. В качестве модели ТП используется статическая математическая модель атмосферного блока, разработанная в программном пакете моделирования ХТП Honeywell UNISIM Design. Алгоритм управления реализован в среде моделирования Simulink пакета MatLab по схеме, представленной на рис. 3. Алгоритмы адаптации моделей управления и прогнозирования

реализованы в виде скрипта MatLab. Для адаптации моделей прогнозирования и управления используется алгоритм стохастический аппроксимации для линейных моделей [3].

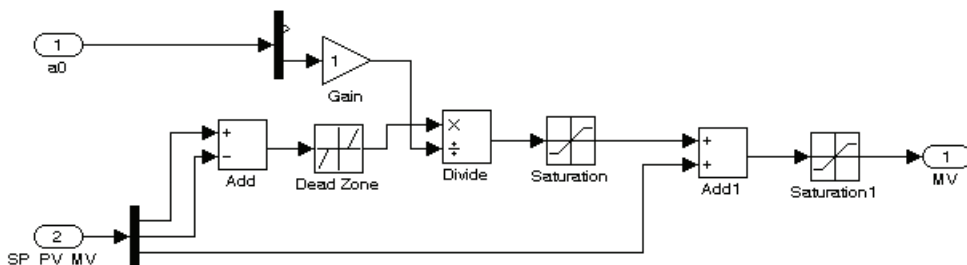


Рис.3. Схема моделирования алгоритма управления

На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $\mathbf{a0}$  – вектор коэффициентов модели управления;  $\mathbf{SP\_PV\_MV\_}$  – объединенный вектор задания, прогнозируемого значения показателя качества и значения управляющей величины на предыдущем шаге управления;  $\mathbf{MV}$  – управляющее воздействие на текущем шаге управления.

Методика проведенного вычислительного эксперимента включает:

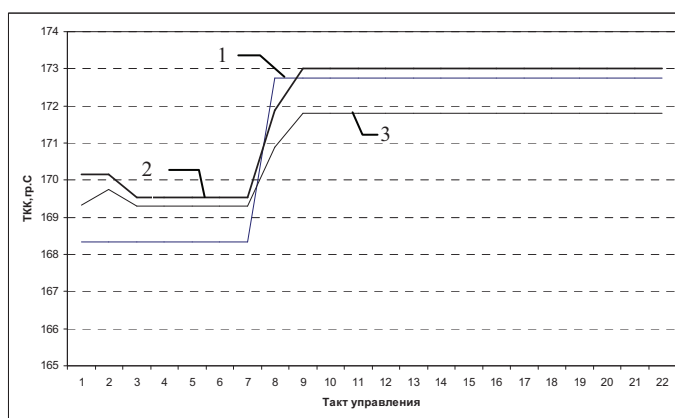
- 1) прогнозирование ТКК бензина К-1 по модели (2);
- 2) расчет управляющих воздействий обратным счетом по модели управления (7);
- 3) адаптацию моделей управления и прогнозирования на каждом 24-м такте управления;
- 4) наложение на эталонное значение ТКК, рассчитанное в UNISIM Design и используемое при адаптации, нормально распределенной помехи с параметрами распределения, соответствующими методике выполнения лабораторного анализа;
- 5) изменение задания на каждом 15-м такте управления с целью оценки его обработки алгоритмом управления. Всего реализуются 100 изменений задания;
- 6) изменение возмущения на каждом 15-м такте управления для оценки реакции на него системы управления. В качестве возмущения используется давление в колонне К-1. Всего реализуются 100 различных значений возмущающего воздействия;
- 7) оценка функционирования алгоритма управления по критериям (5) для задающих воздействий и (6) для возмущений.



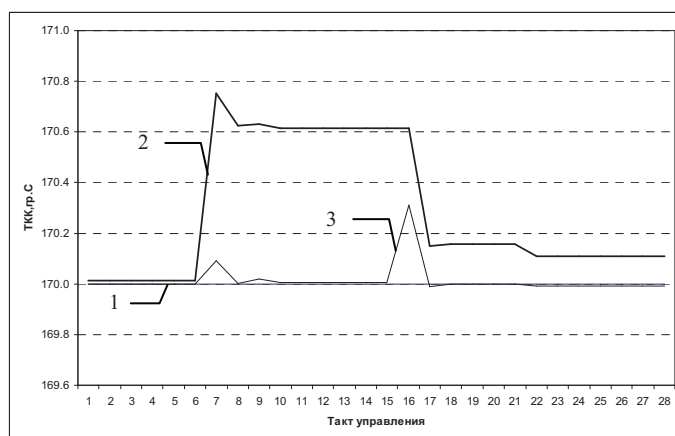
При обработке результатов вычислительного эксперимента с объемом выборки, равном 1500 представителям, для опытов по отработке алгоритмом управления изменения задания были получены следующие значения критериев:  $F = 4,9472$ ;  $R = 0,8966$ ;  $\bar{\Delta} = -0,0421$ ;  $|\Delta|_{\max} = 4,4422$ , а также значение критерия качества управления  $Cr = \frac{2,6590}{1,1785} = 2,2563$

в опытах по оценке реакции системы на возмущения.

На рис. 4 представлен пример реакции компьютерной модели на изменение задания и возмущения в технологическом процессе.



*а*



*б*

Рис. 4. Реакция имитационной модели: *а*) на изменение задания ТКК и *б*) возмущающее воздействие в технологический процесс: 1 – кривая задания; 2 – эталонные значения ТКК, рассчитанные в UNISIM Design; 3 – значения ТКК, рассчитанные по модели виртуального анализатора

В качестве возмущения, которое варьировалось в ходе эксперимента, было принято давление в колонне К-1. Это возмущение не входит непосредственно в модель прогнозирования, но его влияние на показатель качества опосредованно проявляется через другие переменные модели прогнозирования ТКК – флегмовое число (*FlegNum*) и отбор бензина (*FbnzDivMoi*), а также при адаптации модели прогнозирования ТКК, что и наблюдается на графиках (рис. 4, б, на 5-м такте – возмущение, на 15-м такте – адаптация).

Значения оценок качества алгоритма управления, полученные при обработке изменения задания и возмущения, и вид графиков (см. рис. 4) позволяют сделать вывод, что предлагаемый алгоритм управления по адаптивным моделям статических режимов работоспособен.

Основной режим работы установки АВТ является установившимся, при котором характеристики объекта управления можно считать статическими в течение длительных отрезков времени. Поэтому рассмотренный алгоритм может быть применен на технологической установке при управлении качеством бензина по показателю ТКК. Расчет и реализация управляющего воздействия на каждом такте управления осуществляются при условии достижения установившегося состояния объекта управления. Длительность одного такта управления берется достаточной для релаксации объекта управления после реализации управляющего воздействия на предыдущем такте.

В работе предложен и на основе результатов вычислительного эксперимента обоснован алгоритм расчета управляющего воздействия обратным счетом по модели прогнозирования ТКК. Обоснованы целесообразность разделения моделей прогнозирования и управления, а также возможность использования для целей управления однопараметрической модели. Проведен вычислительный эксперимент по оценке работоспособности предлагаемого алгоритма управления для статических режимов, результаты которого свидетельствуют о возможности его применения в системе управления промышленной установкой АВТ.

### **Библиографический список**

1. Власов С.С., Шумихин А.Г. Разработка математической модели для прогнозирования качества бензина установки атмосферно-вакуумной перегонки // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: тез. краевой науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010.

2. Власов С.С., Шумихин А.Г. Адаптация математической модели для прогнозирования качества бензина установки атмосферно-вакуумной перегонки // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: тез. краевой науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010.

3. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Адаптивные модели в системах управления. – М.: Советское радио, 1966.

Получено 04.10.2010