

Р. А. Замалетдинов, А. В. Мушнин, В. В. Елизаров,  
В. И. Елизаров

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА И ОСТАНОВКИ ПЕЧЕЙ ПИРОЛИЗА Е-ВА-121, Е-ВА-122

*Ключевые слова: экспериментально-статистический, регрессионный анализ.*

*Описывается экспериментально-статистический и регрессионный анализ математической модели пуска и остановки печей пиролиза Е-ВА-121, Е-ВА-122 типа SRT-IV HC, работающих на сырье – этане.*

*Keywords: experimental and statistic, regression analysis.*

*Describes the experimental and statistical regression analysis a mathematical model of start and stop of pyrolysis furnaces E-BA-121, E-BA-122 SRT-IV HC type furnace, working on raw material - ethane.*

### Введение

Пиролиз – это процесс термического разложения углеводородов с водяным паром, состоящий из множества простых реакций, которые протекают параллельно и последовательно. Химические реакции пиролиза условно подразделяются на две последовательные стадии. Первая стадия – первичные реакции термического разложения парафинов (этана, бутана, пропана) с образованием олефинов (этилен, пропилен), диолефинов (1,3-бутадиен) и парафинов низшего ряда (метан), водорода. Вторая стадия – вторичные реакции дегидрирования, расщепления и конденсации образовавшихся в ходе первичных реакций олефинов и диолефинов; при этом образуются ненасыщенные циклические и ароматические соединения сложного строения [1].

В промышленности наибольшее распространение получили трубчатые печи пиролиза. Эксплуатация печных блоков ведется в циклическом режиме: нагрев – пиролиз – выжиг кокса – охлаждение – чистка ЗИА. Длительность цикла тем больше, чем больше время пробега печи в режиме пиролиза. Длительность пробега печей определяется рядом факторов. Основной из них – температура процесса во время пиролиза. Чем она выше, тем больше в пирогазе концентрация соединений, приводящих к образованию и отложению кокса на стенках труб. Наблюдающаяся в промышленных печах глубина превращения исходных углеводородов в кокс невелика: выход кокса составляет не менее 0,01% сырья [2], но неблагоприятное воздействие пленки кокса, на результаты пиролиза, значительно. Отложение кокса затрудняет теплопередачу через стенку змеевика, способствует ускорению науглероживания, коррозии и износа материала труб, что ведет к снижению выходов олефинов, снижению срока службы труб, уменьшению длительности межремонтных периодов эксплуатации печей. Наибольшее коксообразование происходит на трех последних трубах и, как правило, на перегретых участках. Время пробега печи также в значительной степени определяется состоянием горелочных устройств. Горелки печей пиролиза имеют разные мощности и температуру излучающей чаши при

разном рассеивании дымового газа. Чем выше температура чаши горелки и больше разница температур ее и светящейся стенки печи, тем больше зона перегрева на трубах змеевика. Следует подчеркнуть, что на печах фирмы «Cheros», где эта разница достигает 170 °С, трубы выходят из строя в несколько раз быстрее, чем на печах фирмы «Lumpus», где разница составляет только 65-70 °С. Использование горелок, которые исключают разницу температур излучающей стенки и сферы горелок и точечный перегрев участков труб, находящихся против чаши горелок, и характеризуются равномерным распределением температур по длине и высоте излучающей стенки, будет способствовать увеличению срока службы труб змеевиков [1].

Рассматриваемая печь по регламенту при пиролизе этана должна иметь средний пробег в 700 часов. Фактический пробег составляет не более 675 часов. Такой не полный пробег печи можно объяснить колебаниями температур во время пуска и сушки печи, из-за которых происходят деформации и прогибы радиантных змеевиков, в следствии чего уменьшается полезное сечение змеевика и ускоряется процесс коксообразования. Второй причиной является избыток кислорода в дымовых газах на перевале печи, который приводит к неполному сжиганию топлива в радиантной секции печи, вследствие чего дожигание топливного газа может происходить в зоне перехода из радиантной в конвекционную секцию печи, что приводит к перегреву в конвекционной секции печи из-за сверхвысокой температуры дымовых газов. Перегрев приведёт к коксоотложениям в змеевиках конвекционной секции и образованию в них «коксовых пробок». В результате по этим змеевикам ухудшается проход сырья и змеевики перегреваются до ярко красного состояния, что требует внепланового останова печи [1].

Путем решения проблемы не полного пробега печи на старых производствах является модернизация систем управления. Завод Этилен – 600 является частью ОАО «НКНХ», на котором в 2009 году была завершена 2-ая реконструкция узла пиролиза и первичного фракционирования, в ходе которого была произведена модернизация системы управления. На производстве установлена РСУ

Centum CS 3000 R3. На печах пиролиза используются интеллектуальные датчики фирмы АВВ. Также была произведена замена горелочных устройств на печах Е-ВА-121(-122). Следовательно, пути решения проблемы не полного пробега печи при помощи внедрения современных средств автоматизации практически исчерпаны. Целесообразным остаётся только внедрение автоматов горения для управления работой горелок, которые должны уменьшить неравномерность нагрева змеевика по всей его длине. Дальнейшим путём решения не полного пробега печи является разработка и внедрение алгоритма управления пуском, сушкой, пиролизом, декоксованием и остановкой печи, с соблюдением требований регламента. Для проверки и отладки работы алгоритма управления необходимо рассчитать математическую модель печи.

### Экспериментально-статистический анализ

В тех случаях, когда информации о рассматриваемом процессе недостаточно или процесс настолько сложен, что невозможно составить его детерминированную модель, прибегают к экспериментально-статистическим методам. Процесс при этом рассматривают как “черный ящик”. Различают пассивный и активный эксперимент.

Пассивный эксперимент, используемый в работе, является традиционным методом, когда ставится большая серия опытов с поочередным варьированием каждой из переменных; к пассивному эксперименту относится также сбор исходного статистического материала в режиме нормальной эксплуатации на промышленном объекте. Обработка опытных данных в этом случае для получения математической модели проводится методами классического регрессионного и корреляционного анализа.

Используя при обработке опытных данных принцип регрессионного и корреляционного анализа, удастся найти зависимость между переменными и условиями оптимума. В обоих случаях математической моделью является функция отклика, связывающая параметр оптимизации, характеризующий результаты эксперимента, с переменными параметрами, которыми экспериментатор варьирует при проведении опытов.

При использовании статистических методов математическая модель представляется в виде полинома – отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная зависимость [3,4]

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k \beta_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \dots \quad \text{В}$$

связи с тем, что в реальном процессе всегда существуют неуправляемые и неконтролируемые переменные, изменение величины носит случайный характер. Поэтому при обработке экспериментальных данных получают так называемые выборочные коэффициенты регрессии  $b_0, b_j, b_{uj}, b_{jj}$ , являющиеся оценками

теоретических коэффициентов  $\beta_0, \beta_j, \beta_{uj}, \beta_{jj}$ .

Уравнение регрессии, описывающее связь между многими величинами, полученное на основании опыта, запишется следующим образом:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов из условия:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min.$$

Здесь  $N$  – объем выборки из всей совокупности значений исследуемых параметров. Разность между объемом выборки  $N$  и числом связей, наложенных на эту выборку  $L$ , называется числом степеней свободы выборки  $f$ :

$$f = N - L.$$

При отыскании уравнения регрессии число связей равно числу определяемых коэффициентов.

Вид уравнения регрессии выбирается путем экспериментального подбора.

После того как уравнение регрессии найдено, необходимо провести статистический анализ результатов. Этот анализ состоит в следующем: проверяется значимость всех коэффициентов регрессии в сравнении с ошибкой воспроизводимости и устанавливается адекватность уравнения. Такое исследование носит название *регрессионного анализа* [3,4].

### Регрессионный анализ

Адекватность полученного уравнения проверяется по критерию Фишера, адаптированного для случая, когда отсутствуют параллельные опыты (используются данные пассивного эксперимента):

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2},$$

где  $S_y^2$  – дисперсия относительно среднего:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1},$$

$$S_{\text{ост}}^2 - \text{остаточная дисперсия: } S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - 1}.$$

Чем больше  $F$  относительно табличного  $F_p(f_1, f_2)$  для выбранного уровня значимости  $p$  и чисел степеней свободы  $f_1 = N - 1$  и  $f_2 = N - L$ , тем эффективнее уравнение регрессии.

### Расчёт математической модели параметров печи

Из исходного объема экспериментальных данных (срез из БД интервалом в 1 мин) в таблицах 1 и 2 приведена выборка с интервалом в 10 часов. В таблице 2 значения каждой из строк взяты в те-же моменты времени, что и в таблице 1. Пределы погрешностей температур составляют: для ТП-121-1 ( $\pm 13,5^\circ\text{C}$ ), ТП-121-26 ( $\pm 6,7^\circ\text{C}$ ), ТПС-121-28/ТП-121-33 ( $\pm 8,1^\circ\text{C}$ ). Пределы погрешностей расходов

составляют: для FIC-121-1(±220кг/ч), FIC-121-5/FIC-121-28 (±44,5кг/ч), FIC-121-21(±50 кг/ч), FIC-121-23(±98кг/ч).

**Таблица 1 – Расходы энергетических и сырьевых потоков**

t	FIC-121-1	FIC-121-5	FI-121-21	FI-121-23	FIC-121-28
h.	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h
19	0	0	419	0	0
29	700	2165	688	4000	0
39	0	2143	905	13269	1000
49	0	2132	896	13262	1000
59	0	2148	909	15417	1200
69	0	2155	907	14899	1200
79	0	2156	929	15354	1200
89	0	2835	843	15354	1300
99	4860	1609	3426	19838	1400
109	4861	1605	3411	21432	1400

**Таблица 2 – Температуры**

TI-121-1	TI-121-9	TI-121-17	TI-121-22	TI-121-26	TI-121-28	TI-121-33
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
157	144	172	184	120	147	142
499	490	414	467	278	409	379
797	796	633	767	352	515	465
802	802	630	772	353	514	460
819	819	652	795	353	516	473
808	807	649	792	350	514	472
815	815	655	783	349	516	475
708	709	586	688	348	516	455
832	832	867	1178	375	517	455
832	831	866	1182	376	518	454

1) TI-121-1. Температура паровоздушной смеси на выходе из радиантного змеевика № 1.

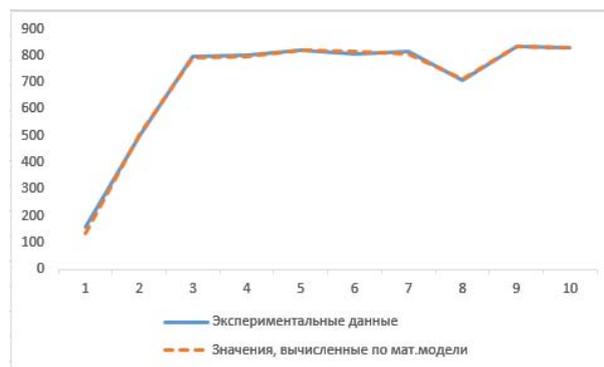
В ходе анализа было выявлено, что температура паровоздушной смеси на выходе из радиантного змеевика № 1 зависит от температуры на перевале печи, расходов сырья и пара разбавления в змеевик. Вид уравнения регрессии – полином 2-ой степени:  $T_{z1}=1,573T_{г}+0,041F1+0,008178F2-0,00006358T_{г}F1-0,00002393T_{г}F2-0,000003049F1F2-0,0004194(T_{г}^2)-0,000003441(F1^2)-0,0000006935(F2^2)-140,135$ , где  $T_{г}$  – температура дымовых газов на перевале печи в таблице №2 (TI-121-22),  $F1$  – расход сырья в 1-ый змеевик в таблице №1 (FIC-121-1),  $F2$  – расход пара разбавления в 1-ый змеевик в таблице 1 (FIC-121-5).

Для проверки адекватности уравнения регрессии производится расчёт критерия Фишера. Расчётное значение получилось равным 70,42, табличное значение 3,6. Следовательно, уравнение адекватно.

2) TI-121-22. Температура дымовых газов на перевале печи.

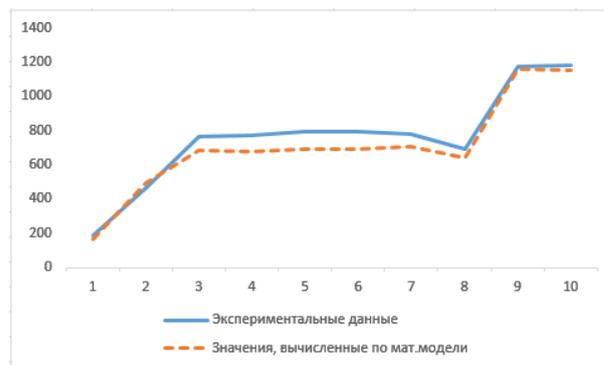
В ходе анализа было выявлено, что температура на перевале печи зависит от расхода топливного газа, подаваемого на 128 горелок фирмы John Zink. Вид уравнения регрессии – полином 3-ей степени:  $T_{г} = 2,093F_{г}-0,0009(F_{г}^2)+10^{-7}(F_{г}^3)-563,7211$ , где  $F_{г}$  – расход топливного газа в таблице

№1 (FI-121-21).



**Рис. 1 – Изменение температуры паровоздушной смеси на выходе из радиантного змеевика № 1, в зависимости от температуры дымовых газов на перевале печи, расхода сырья и пара разбавления во время пуска печи из теплового резерва**

Для проверки адекватности уравнения регрессии производится расчёт критерия Фишера. Расчётное значение получилось равным 16,62, табличное значение 3,6. Следовательно, уравнение адекватно.

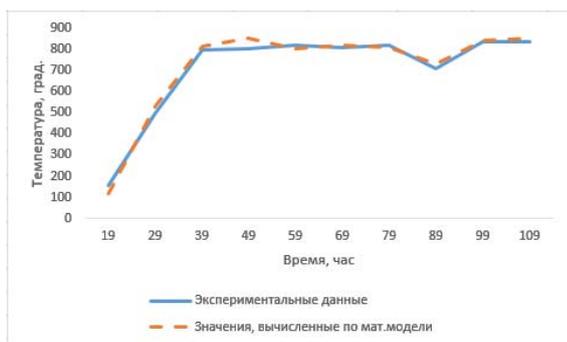


**Рис. 2 – Изменение температуры дымовых газов на перевале печи, в зависимости от расхода топливного газа во время пуска печи из теплового резерва**

3) TI-121-26. Температура паровоздушной смеси на выходе из ЗИА Е-ЕА-121А.

В ходе анализа было выявлено, что температура паровоздушной смеси на выходе из ЗИА Е-ЕА-121А зависит от средней температуры на выходе из радиантных змеевиков и паро-генерации ЗИА Е-ЕА-121А. Вид уравнения регрессии – полином 1-ой степени:  $T_{пвс1} = 0,355T + 0,04F_{р} - 0,00004558T F_{р} + 30,595$ , где  $T$  – средняя температура на выходе из змеевиков в таблице 2 (TI-121-9),  $F_{р}$  – расход пара высокого давления в таблице №1 (FI-121-23).

Для проверки адекватности уравнения регрессии производится расчёт критерия Фишера. Расчётное значение получилось равным 8,049, табличное значение 3,6. Следовательно, уравнение адекватно.



**Рис. 3 – Изменение температуры паровоздушной смеси на выходе из ЗИА Е-ЕА-121А, в зависимости от средней температуры на выходе из радиантных змеевиков и генерации пара высокого давления во время пуска печи из теплового резерва**

4) ПИ-121-28. Температура пара высокого давления на выходе из печи.

В ходе анализа было выявлено, что температура пара высокого давления на выходе из печи зависит от температуры дымовых газов в модуле перегрева пара высокого давления №6, температуры пара на выходе из модуля перегрева пара высокого давления №5, расхода бесфосфатной охлаждающей воды в узел охлаждения пара высокого давления и генерации пара высокого давления. Вид уравнения регрессии – полином 2-ой степени:

$$T_{пвд} = 0.786T + 0.018F_p + 0.347T_{33} - 0.00007629T F_p - 0.006062T T_{33} + 0.0001216F_p T_{33} + 0.002178(T^2) - 0.0000001957(F_p^2) + 0.002841(T_{33}^2) - 11.883 + F_w(-0.15),$$

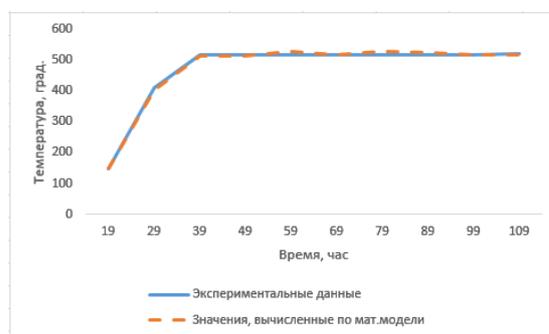
где T – температура дымовых газов перед модулем №5 в таблице 2 (ПИ-121-17), T<sub>33</sub> – температура пара высокого давления на выходе из модуля №4 перегрева пара высокого давления в таблице №2 (ПИ-121-33), F<sub>p</sub> – расход генерируемого ЗИА пара высокого давления в таблице №1 (ПИ-121-23), F<sub>w</sub> – расход бесфосфатной котловой воды в таблице №1 (ПИ-121-28).

Для проверки адекватности уравнения регрессии производится расчёт критерия Фишера. Расчётное значение получилось равным 343,2227, табличное значение 3,6. Следовательно, уравнение адекватно.

### Заключение

На основе полученной математической модели был реализован алгоритм пуска и остановки печей Е-ВА-121(-122) завода Этилен – 600 ОАО «НКНХ». Математическая модель была внедрена в виртуальный контроллер РСУ Centum CS 3000 R3, для которого был написан алгоритм управления. Была реализована мнемосхема для управления

процессом и индикации параметров печи. Полученная в итоге система из математической модели и мнемосхемы станции оператора системы управления подходит для обучения операторов-технологов, которые занимаются ведением технологического процесса пиролиза [5,6].



**Рис. 4 – Изменение температуры пара высокого давления на выходе из печи, в зависимости от температуры дымовых газов в модуле перегрева пара высокого давления №6, температуры пара на выходе из модуля перегрева пара высокого давления №5, расхода бесфосфатной охлаждающей воды в узел охлаждения пара высокого давления и генерации пара высокого давления**

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № 14.Z56.14.5663-МД от 03.02.2014 г.*

### Литература

1. Т.Н. Мухина, Н.Л. Баранов, С.Е. Бабаш и др. *Пиролиз углеводородного сырья*. М.: Химия 1987, 240 с.
2. G. F. Froment, *Thermal cracking for olefins production. Fundamentals and their application to industrial problems. Chemical Engineering Science*. 1981. Volume 36 Pages 1271-1282.
3. В. В. Кафаров, *Методы кибернетики в химии и химической технологии*. – М.: Химия, 1985. – 448 с
4. Т.Н. Гартман, Д.В. Клушин, *Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов*. М.: Академкнига, 2006. — 416 с.
5. А.В. Мушнин, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров, *Разработка компьютерных тренажеров по ликвидации аварийных ситуаций в химической промышленности. Вестн. Казан. гос. технолог. ун-та*. 2012. Т. 15. № 8. – С. 348–351.
6. В.И. Елизаров, Э.Р. Галеев, А.В. Мушнин, Н.Г. Смолин, И.М. Валеев, *Состав и структура распределенного компьютерного тренажера. Вестн. Казан. гос. технолог. ун-та*. 2013. Т. 16. № 20. – С. 288–290.

© Р. А. Замалетдинов – студент гр. 3902 НХТИ КНИТУ, ZRuslan2006@gmail.com; А. В. Мушнин – инженер кафедры автоматизации технологических процессов и производств КНИТУ, aleksey\_muschinin@mail.ru; В. В. Елизаров – д-р техн. наук, профессор, директор НХТИ КНИТУ, pd@nchti.ru; В. И. Елизаров – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. автоматизации технологических процессов и производств НХТИ КНИТУ, atpp.nchti@mail.ru.