

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 коксообразования 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 «Lumtus», 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 PCU Centum CS 3000 R3. На печах пиролиза используются интеллектуальные датчики фирмы ABB. Также была произведена замена горелочных устройств на печах E-BA-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]. 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_1, b_2, b_3 , являющиеся оценками теоретических коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$. Уравнение регрессии, описывающее связь между многими величинами, полученное на основании опыта, запишется следующим образом:
$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$
 Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов из условия:
$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$$
 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):
$$F = \frac{MS_{\text{регрессии}}}{MS_{\text{ошибки}}}$$
 где $MS_{\text{регрессии}}$ - дисперсия относительно среднего; $MS_{\text{ошибки}}$ - остаточная дисперсия. Чем больше F относительно табличного для выбранного уровня значимости p и чисел степеней свободы f_1 и f_2 , тем эффективнее уравнение регрессии. Расчет 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 TI-121-1 ($\pm 13,5^\circ\text{C}$), TI-121-26 ($\pm 6,7^\circ\text{C}$), TIC-121-28/TI-121-33 ($\pm 8,1^\circ\text{C}$). Пределы погрешностей расходов составляют: для FIC-121-1 ($\pm 220\text{кг/ч}$), FIC-121-5/ FIC-121-28 ($\pm 44,5\text{кг/ч}$), FIC-121-21 ($\pm 50\text{ кг/ч}$), FIC-121-23 ($\pm 98\text{кг/ч}$). 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 00	419 00	29 700	2165 688	4000 039	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 TIC-121-28 TI-121-33 °C °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: $T_{z1} = 1,573T_g + 0,041F_1 + 0,008178F_2 - 0,00006358T_gF_1 - 0,00002393T_gF_2 - 0,000003049F_1F_2 - 0,0004194(T_g^2) - 0,000003441(F_1^2) - 0,0000006935(F_2^2) - 140,135$, где T_g - температура дымовых газов на перевале печи в таблице №2 (TI-121-22), F_1 - расход сырья в 1-ый змеевик в таблице №1 (FIC-121-1), F_2 - 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: $T_g = 2,093F_g - 0,0009(F_g^2) + 10^{-7}(F_g^3) - 563,7211$, где F_g - 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 теплого 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 теплого 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: $T_{пвс1} = 0.355T + 0.04F_p - 0.00004558TF_p + 30.595$, где T - средняя температура на выходе из змеевиков в таблице 2 (TI-121-9), F_p - 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 теплого резерва.

4) TI-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: $T_{пвд} = 0.786T + 0.018F_p + 0.347T_{33} - 0.00007629TF_p - 0.006062TT_{33} + 0.0001216F_pT_{33} + 0.002178(T_2) - 0.0000001957(F_p^2) + 0.002841(T_{33}^2) - 11.883 + F_w(-0.15)$, где T - температура дымовых газов перед модулем №5 в таблице 2 (TI-121-17), T₃₃ - температура пара высокого давления на выходе из модуля №4 перегрева пара высокого давления в таблице №2 (TI-121-33), F_p - расход генерируемого ЗИА пара высокого давления в таблице №1 (FI-121-23), F_w - расход бесфосфатной котловой воды в таблице №1 (FIC-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 E-BA-121(-122) завода Этилен - 600 ОАО «НКНХ». Математическая модель была внедрена в виртуальный контроллер PCY 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