

УДК 62–52

**А.П. Веревкин**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», e-mail: arverevkin@mail.ru; **Д.В. Калашник**, аспирант, e-mail: kalash.ufa@mail.ru; **М.Х. Хуснияров**, д.т.н., профессор, проректор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, e-mail: xmx@tps-expert.ru

## ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИЭТИЛЕНА ПО ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА (ИНДЕКСУ РАСПЛАВА)

*В настоящее время при производстве полиэтилена для поддержания качества (индекса расплава) используется ручной режим управления. Определение индекса расплава осуществляется по лабораторным данным, что влечет за собой большое запаздывание при управлении процессом и, как следствие, приводит к недопустимым колебаниям качества продукта. Рассматривается построение автоматизированной системы управления технологическим процессом по показателю качества, который оценивается с использованием модели. Исследование качества управления систем с различными видами регуляторов (ПИ-регулятор и регулятор на основе нечеткой логики) проводится на имитационной модели.*

**Ключевые слова:** полиэтилен, индекс расплава, полимеризация, управление, качество, нечеткая логика.

Основной целью управления технологическим процессом полимеризации этилена является достижение заданного качества производимого полиэтилена, которое характеризуется значением индекса расплава (ИР) [1]. В настоящее время управление технологическим процессом полимеризации осуществляется оператором, который на основе опыта и косвенных параметров, влияющих на реакцию полимеризации, принимает решения по управлению процессом для получения продукта соответствующего качества. Одной из главных проблем управления процессами с рециклом является большая задержка в получении информации по показателю качества из-за «большой памяти» процесса и длительности его определения в лабораторных условиях. В работе [2] рассмотрены вопросы оценки текущего значения, а также прогноза ИР на основе параметров реакции полимеризации. Разностная модель для определения текущего ( $i - o$ ) значения ИР имеет следующий вид:

$$IP_i = \sum_{k=i-1}^{i-n} a_k \cdot IP_k + \sum_{k=i}^{i-n} b_k \cdot P_k + \sum_{k=i}^{i-n} c_k \cdot \Delta P_k + \sum_{k=i}^{i-n} d_k \cdot T_k + \sum_{k=i}^{i-n} e_k \cdot \Delta T_{25-18k} + \sum_{k=i}^{i-n} f_k \cdot \Delta T_{29-14k} + g \quad (1)$$

где  $IP_i$  – индекс расплава,  
 $a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k, g$  – коэффициенты модели,  
 $P_k$  – давления в реакторе,  
 $\Delta P_k$  – глубина сброса давления,  
 $T_k$  – период сброса давления,  
 $\Delta T_{25-18}$  – разность температур между 25-м и 18-м коленами реактора,  
 $\Delta T_{29-14}$  – разность температур между 29-м и 14-м коленами реактора,  
 $n$  – число данных архива,  
 $i$  – индекс текущего момента времени.

Прогноз индекса расплава может быть получен путем итеративного применения соотношения вида (1) для моментов времени с индексами  $i + 1, i + 2$  и т.д. При этом необходимо знать прогнозные значения параметров реакции. Разностная модель для определения прогнозного ( $i + l - o$ ) значения на

примере давления в реакторе имеет следующий вид:

$$P_{\text{прог}} = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i, \quad (2)$$

где  $P_{\text{прог}}$  – прогноз давления в реакторе,  
 $n$  – число данных архива,  
 $C_i$  – коэффициенты модели,  
 $P_i$  – давления в реакторе на  $i$  предыдущих шагах.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления процессом полимеризации по значению ИР и проверка качества управления предлагаемой системы на имитационной модели. Отметим, что представленный материал имеет также определенную методическую ценность, поскольку излагаемый подход к построению автоматизированных систем управления по показателям качества может быть использован и для других технологических процессов.

Разработанная автоматизированная система управления процессом полимеризации (АСУ ПП) представляет собой систему управления (рис. 1), со-

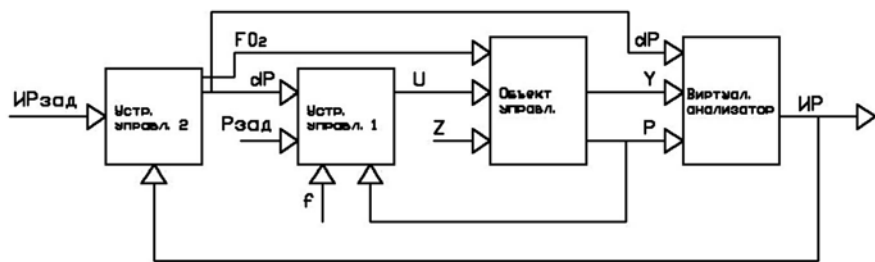


Рис. 1. Структурная схема имитатора автоматизированной системы управления процессом полимеризации

стоящую из следующих блоков: объекта управления, устройства управления 1 (УУ1), виртуального анализатора (реализация моделей вида (1) для текущего  $ИР_{тек}$  и прогнозного  $ИР_{прог}$  значений  $ИР$ ) и устройства управления 2 (УУ2).

Состояние объекта управления определяется следующими параметрами: расходом инициатора реакции – кислорода  $FO_2$ , выходом  $U$  устройства управления 1, а также набором параметров  $Z$ , включающим в себя значения уставок максимального периода сброса давления в реакторе  $t_{max}$  и максимальной заданной температуры в реакторе  $T_{max}^{зад}$ , вводимых оператором. Состояние объекта управления характеризуется давлением в реакторе  $P$ , а также вектором параметров  $Y$ , включающим в себя температуры

по длине реактора  $T14, T18, T25, T29$  и период сброса давления в реакторе  $t$ . Состояние УУ1 определяется следующими параметрами: значением заданного давления в реакторе  $P_{зад}$ , частотой  $f$  срабатывания программы сброса давления при достижении максимальной температуры  $T_{max}^{зад}$ , текущим значением давления в реакторе  $P$  и заданной глубиной сброса давления  $dP$ . Таким образом, УУ1 формирует значение управляющего сигнала на исполнительное устройство поддержания давления в реакторе  $U$  как некую композицию (оператор  $F$ ) перечисленных параметров.

Объект управления и УУ1 образуют единый технологический блок, разработанный авторами технологии и рассматриваемый в качестве неизменяемой части системы, модель которой на то-

пологическом уровне имеет следующий вид (рис. 2).

Для достижения цели работы предложена схема реализации УУ2 с использованием устройства управления на основе нечеткой логики. Устройство управления 2 формирует такие управления, как расход инициатора реакции – кислорода  $FO_2$  и заданную глубину сброса давления  $dP$ . В качестве входной информации используются следующие параметры: заданное значение индекса расплава  $ИР_{зад}$ , текущая и прогнозная оценки  $ИР$ .

На параметры  $dP$  и расход  $FO_2$  накладываются технологические ограничения по интенсивности.

Выбор структуры УУ2 в классе ситуационных управляющих устройств с нечеткой логикой обусловлен существенной взаимосвязью технологических параметров и необходимостью использования эвристических знаний по управлению процессом. В частности, имеется возможность улучшить процесс управления за счет использования информации о прогнозных значениях  $ИР$ .

В качестве базы построения УУ2 был использован алгоритм Мамдани [3], который может быть легко встроен в существующую систему управления.

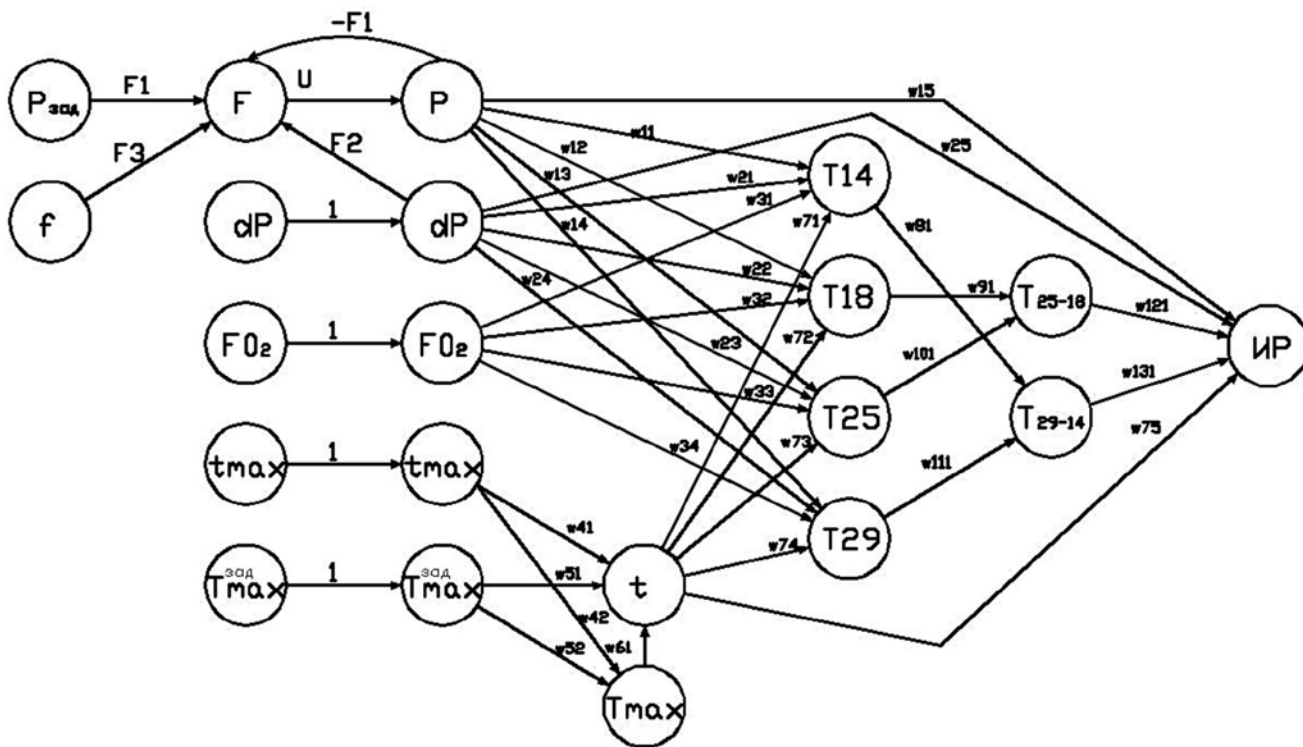


Рис. 2. Модель неизменяемой части системы на топологическом уровне определенности

Для анализа эффективности работы системы с УУ2 на основе нечеткой логики проведен сравнительный анализ работы системы с ПИ-регулятором для регулирования глубины сброса давления  $dP$  при неизменном расходе кислорода  $FO_2$ . Данное сопоставление вполне уместно, т.к. при ручном управлении процессом значение  $dP$  изменяется оператором в течение нескольких минут, в то время как расход кислорода  $FO_2$  не меняется в течение существенно более длительного времени. Таким образом, использование ПИ-регулятора – это, по сути, имитация работы оператора, имеющего информацию о текущем ИР и его прогнозе в реальном времени.

Для формализации плохо структурированных знаний операторов использовалась следующая методика:

- 1) На первом этапе определяются векторы контролируемых, регулируемых параметров и внутренних переменных устройства управления. При этом одному и тому же контролируемому параметру будут соответствовать одна или несколько внутренних переменных.
- 2) После измерения и определения значений всех переменных формировалась система продукционных правил. Можно выделить два основных метода формирования продукционной системы (ПС): метод, основанный на анализе возможных технологических ситуаций, и метод анализа имеющихся эвристических правил. Последний метод не

гарантирует полноты системы, поэтому далее рассматривается первый метод. Метод анализа возможных технологических ситуаций заключается в выявлении (перечислении, которое может быть организовано формализованными методами) всех возможных ситуаций, представлении их на рассмотрение экспертам и в формировании правил на основе их заключений.

Экспертная информация может быть представлена в виде правил «Если ..., то ...», например:

Если  $ИР_{тек} \uparrow$  и  $ИР_{прог} \uparrow$ , то  $dP \uparrow$  и  $FO_2 \downarrow$ ,  
где  $ИР_{тек} \uparrow$ ,  $ИР_{прог} \uparrow$ ,  $dP \uparrow$  и  $FO_2 \downarrow$  – логические переменные, соответствующие изменениям переменных. Стрелки « $\uparrow$ » и « $\downarrow$ » обозначают повышение и понижение значения параметра соответственно.

В случае если оператор выдает несколько вариантов управлений, эти варианты записываются в виде дизъюнкции термов, каждый из которых соответствует своему варианту. Термы в дизъюнкции располагаются в порядке убывания степени уверенности в них эксперта или степени предпочтительности. Эти степени могут быть представлены в формализованном виде.

- 3) Обобщение правил. Оно применяется для упрощения ПС и уменьшения числа правил и происходит путем объединения правил по принципу: если два правила имеют одинаковые antecedentes, консеквенты правил объединяются знаком конъюнкции; если два правила имеют одинаковые консеквенты и в

состав antecedentes не входят внутренние переменные  $V$ , antecedentes объединяются знаком дизъюнкции.

- 4) Выявление и ликвидация конфликтов. Для выявления правил, которые одновременно инициализируют противоположные управляющие воздействия, возможно либо дополнение системы набором метаправил, корректирующих работу процедуры в подобных случаях, либо запрет одновременного исполнения нескольких правил.

- 5) Минимизация логических выражений. Данная процедура в разработанном алгоритме реализуется параллельно процедуре ликвидации конфликтов, так как производится также путем попарного сравнения правил с последующим их объединением.

В результате синтезируется минимизированный набор логических выражений, готовый к реализации на контроллерах (таблица). В блоке УУ2 прописываются минимизированные логические выражения, в которых для краткости используются следующие обозначения:

а) для antecedента:  $\uparrow\uparrow$  – очень высокий;  $\uparrow$  – высокий; – – норма;  $\downarrow$  – низкий;  $\downarrow\downarrow$  – очень низкий;

б) для консеквента:  $\uparrow\uparrow$  – сильно повысить;  $\uparrow$  – повысить; – – не менять;  $\downarrow$  – понизить;  $\downarrow\downarrow$  – сильно понизить.

Необходимо отметить, что для удобства формирования функций принадлежности и корректной работы регулятора целесообразно предварительно отмасштабировать переменные от 0 до 1.

**Таблица. Набор правил для УУ2 на основе нечеткой логики**

Номер правила	Антецент	Консеквент
1	$(ИР_{тек} \downarrow\downarrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow\downarrow)$ или $(ИР_{тек} \downarrow\downarrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow)$ или $(ИР_{тек} \downarrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow\downarrow)$	$dP \downarrow\downarrow \text{ и } FO_2 \uparrow$
2	$(ИР_{тек} \downarrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow)$ или $(ИР_{тек} \downarrow \text{ и } ИР_{прог} -)$ или $(ИР_{тек} - \text{ и } ИР_{прог} )$ или $(ИР_{тек} \downarrow\downarrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow)$ или $(ИР_{тек} \uparrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow\downarrow)$	$dP \downarrow \text{ и } FO_2 -$
3	$(ИР_{тек} - \text{ и } ИР_{прог} -)$	$dP - \text{ и } FO_2 -$
4	$(ИР_{тек} \uparrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow)$ или $(ИР_{тек} \uparrow \text{ и } ИР_{прог} -)$ или $(ИР_{тек} - \text{ и } ИР_{прог} \uparrow)$ или $(ИР_{тек} \uparrow\uparrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow)$ или $(ИР_{тек} \downarrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow\uparrow)$	$dP \uparrow \text{ и } FO_2 -$
5	$(ИР_{тек} \uparrow\uparrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow\uparrow)$ или $(ИР_{тек} \uparrow\uparrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow)$ или $(ИР_{тек} \uparrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow\uparrow)$	$dP \uparrow\uparrow \text{ и } FO_2 \downarrow$
6	$(ИР_{тек} \downarrow \text{ и } ИР_{прог} \uparrow)$	$dP \uparrow \text{ и } FO_2 \downarrow$
7	$(ИР_{тек} \uparrow \text{ и } ИР_{прог} \downarrow)$	$dP \downarrow \text{ и } FO_2 \uparrow$
8	$dP \uparrow$	$dP \downarrow$
9	$dP \downarrow$	$dP \uparrow$
10	$FO_2 \uparrow$	$FO_2 \downarrow\downarrow$
11	$FO_2 \downarrow$	$FO_2 \uparrow\uparrow$

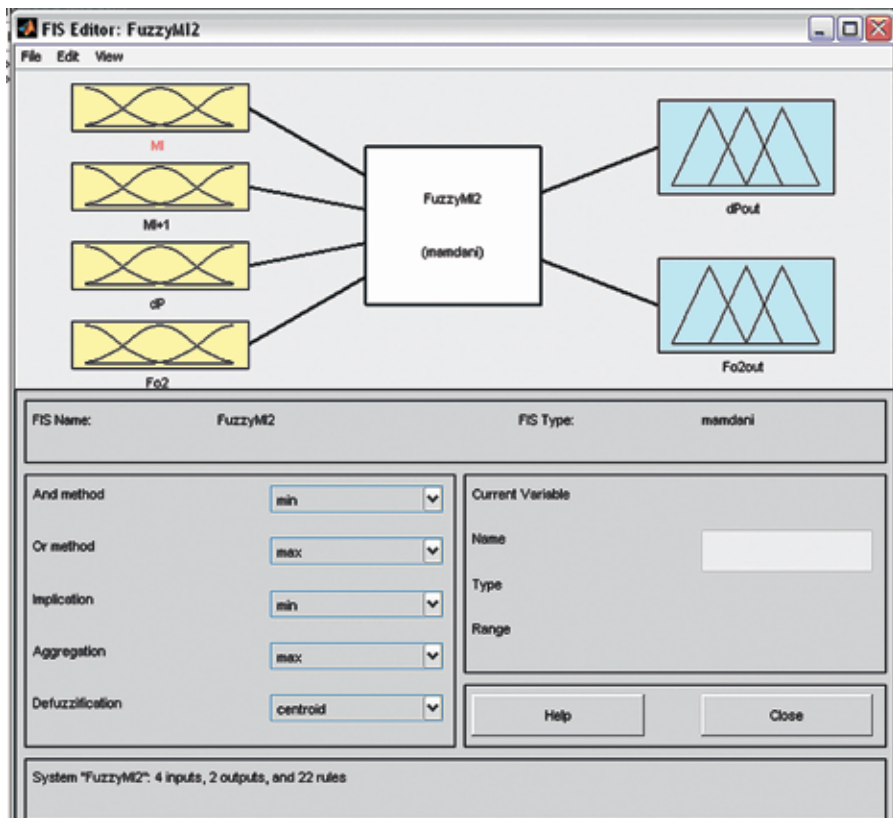


Рис. 3. Структура регулятора MI – текущее значение IP, MI+1 – прогнозное значение IP, dP – текущее значение глубины сброса давления в реакторе, Fo2 – текущий расход кислорода, dPout – изменение глубины сброса давления в реакторе, Fo2out – изменение расхода кислорода

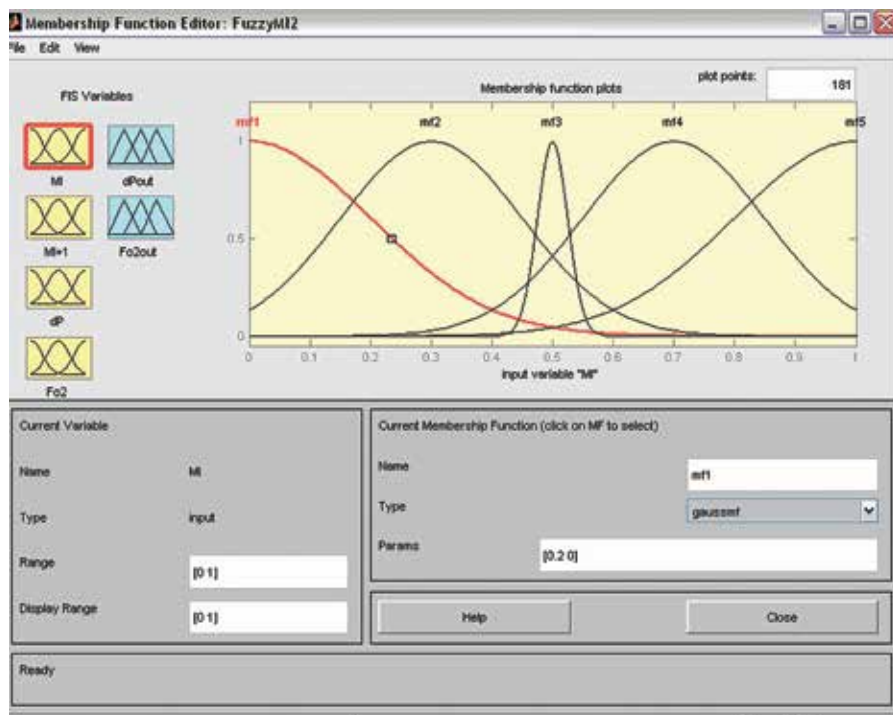


Рис. 4. Блок определения параметров функции принадлежности

Структура нечеткого регулятора представляет собой блоки входных (задающих) сигналов, правил и выходных (управляющих) сигналов (рис. 3).

Во входных блоках определяются параметры функций принадлежности (рис. 4). В блоке правил вводятся наборы логических выражений, приве-

денных выше, по которым формируются выходные сигналы.

Структура и интенсивность управлений соответствуют правилам таблицы. Параметры блоков дефаззификации подбирались с использованием эвристических знаний операторов.

Данная АСУ ПП была исследована на математической модели, разработанной в среде Matlab.

Первым этапом разработки математической модели являлась идентификация объекта управления от концептуального до параметрического уровней определенностей [4]. На концептуальном уровне определялись векторы входных и выходных параметров, на топологическом – связи между отдельными параметрами векторов (рис. 2), на структурном уровне были определены структуры оператора связи – передаточная функция (ПФ), а в случае нелинейности отдельных блоков ПФ дополнены блоками, моделирующими нелинейные элементы. Полученная модель была исследована по всем каналам связи и была признана качественно адекватной реальному объекту.

В среде программного пакета Simulink были проведены эксперименты, связанные со стабилизацией IP, при наиболее частом возмущении – изменении периода сброса давления в реакторе. Подаваемые возмущения имели следующие особенности: максимальная амплитуда не превышала +10% от среднего значения периода сброса давления в реакторе; возмущения носили случайный характер.

По результатам моделирования, представленным на рисунке 5, можно сделать вывод о том, что применение как нечеткого управляющего устройства, так и ПИ – регулятора контура регулирования dP позволяют в целом поддерживать IP.

Видно, что при использовании УУ2 на основе нечеткой логики по сравнению с использованием ПИ-регулятора значительно уменьшается время стабилизации IP, а также значения максимальных отклонений IP.

**ВЫВОДЫ**

1. Предложенная структура АСУ ПП обеспечивает стабилизацию качества полиэтилена в допустимых пределах

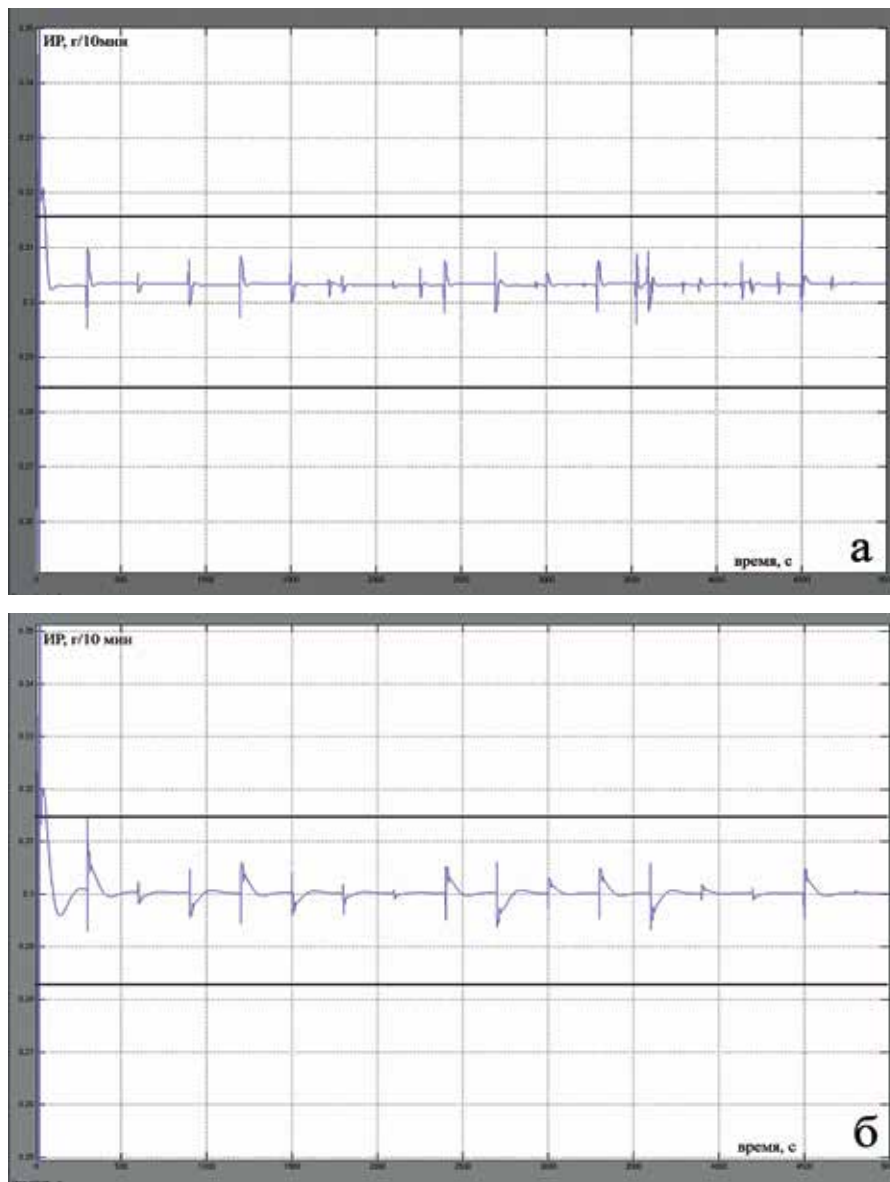


Рис. 5. Стабилизация параметров процесса полимеризации: а – с нечетким регулятором; б – с ПИ-регулятором; черными линиями обозначены границы допустимых значений ИР в пределах одной партии для среднего значения ИР=0,3 г/10 мин.

для одной партии (5% для высшего сорта) по значению ИР при возмущениях порядка +10%. Время переходных процессов, как правило, не превышает нескольких минут.

2. Использование регулятора на основе нечеткой логики позволяет использовать информацию как для текущего, так и прогнозного значения ИР и оперативно вносить коррективы в процесс полимеризации.

3. Использование предложенного подхода к построению АСУ ПП для поддержания значения ИР в реальном масштабе времени позволяет автоматизировать управление технологическим процессом производства полимеров, оставив персоналу функции наблюдения и оперативного контроля, а лаборатории – функцию контроля высшего уровня.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Поляков А.В., Дунтов Ф.И., Софиев А.Э. и др. Полиэтилен высокого давления. Научно-технические основы промышленного синтеза. – Л.: Химия, 1988. – 200 с.
2. Калашник Д.В. Прогнозирование параметров реакции полимеризации в трубчатом реакторе // Сборник трудов Международного форума по проблемам науки, техники и образования / Под ред. В.А. Малинникова, В.В. Вишневого. – М.: Академия наук о земле. – 2012. – 103 с.
3. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant // Proc. IEEE. – 1974. – № 12. – P. 1585–1588.
4. Веревкин А.П., Кирюшин О.В. Теория систем: Учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 71 с.

## Automation

### Operational management of polyethylene production in terms of quality (melt index)

A.P. Verevkin, prof., head of the department, e-mail: apverevkin@mail.ru; D.V. Kalashnik, postgraduate, e-mail: kalash.ufa@mail.ru; M.K. Husniyarov, vice rector of university, Ufa State Petroleum Technological University, e-mail: xmx@tps-expert.ru

*Currently, in the production of polyethylene to maintain the quality (melt index) is used manual control mode. Determination of the melt index is carried out on laboratory analysis, which results in a large delay in the management process and, as a result to unacceptable variations of the product. We explore how to create an automated process control system in terms of quality, which is evaluated by using the model. Investigation of quality management systems with different controllers (PI controller and the controller based on fuzzy logic) is conducted on a simulation model.*

**Keywords:** Polyethylene, melt index, polymerization, control, quality, fuzzy logic.

#### References:

1. Polyakov A.V., Duntov F.I., Sophiev A.E. et al. Polietilen vysokogo davleniya. Nauchno-tekhicheskie osnovy promyshlennogo sinteza (High-pressure polyethylene. Scientific and technical basis for industrial synthesis). – Leningrad: Khimiya, 1988. – 200 p.
2. Kalashnik D.V. Prognozirovaniye parametrov reaktsii polimerizatsii v trubchatom reaktore (Prediction of polymerization reaction parameters in a tubular reactor) // Collected works of the International Forum on Science, Technology and Education / Ed. by V.A. Malinnikova, V.V. Vishnevskogo. – M.: Academy of Sciences about Earth. – 2012. – 103 p.
3. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant // Proc. IEEE. – 1974. – № 12. – P. 1585–1588.
4. Verevkin A.P., Kiryushin O.V. Teoria system (Systems theory): Textbook. – Ufa: Publ. of Ufa State Petroleum Technological University, 2003. – 71 p.