

УДК 541.64:547.313.3:542.97

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА В СРЕДЕ ЖИДКОГО МОНОМЕРА

© 2019 г. А. З. Батыршин^{1, *}, Г. Д. Букатов², И. И. Салахов¹, С. А. Сергеев²,
М. А. Мацько², А. А. Барабанов², А. Г. Сахабутдинов¹

¹ПАО «Нижнекамскнефтехим», Нижнекамск, Россия

²Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: BatyrshinAZ@nknh.ru

Поступила в редакцию 17.03.2018 г.

После доработки 21.05.2018 г.

Принята к публикации 15.10.2018 г.

Установлено влияние условий полимеризации (температуры, продолжительности полимеризации, концентрации мономера и водорода) на процесс полимеризации пропилена в жидком мономере в присутствии каталитической системы $TiCl_4/ДБФ/MgCl_2 + ТЭА/циклогексилметилдиметоксисилан$. Показано, что варьирование условий процесса полимеризации пропилена в изученных интервалах приводит к изменению характеристик образующегося полипропилена. Установлены кинетические параметры процесса полимеризации пропилена в жидком мономере для исследуемой каталитической системы. Определены условия полимеризации, при которых полипропилен образуется с высокими значениями выхода полимера, изотактичности и насыпной плотности. Выявлены параметры процесса, позволяющие эффективно управлять молекулярными и реологическими характеристиками полипропилена.

Ключевые слова: титан-магниевый катализатор, полимеризация пропилена, условия полимеризации, константы скорости, свойства полипропилена.

DOI: 10.1134/S0028242119020035

Ведущее место в промышленности пластиков занимает полипропилен (ПП), мировое производство которого превышает 60 млн т/год [1]. Объем производства ПП непрерывно растет, а ассортимент полипропиленовых марок постоянно расширяется. На сегодняшний день существуют сотни коммерческих марок с разнообразными свойствами и их количество продолжает увеличиваться. Благодаря правильному выбору каталитической системы и условий реакции полимеризации, возможно получение материалов для использования в различных областях применения [2].

Большинство каталитических систем, применяемых в промышленном производстве ПП, на данный момент являются последними поколениями катализаторов Циглера–Натты, например 4-го поколения с диметоксисилановыми электронодонорами и 5-го поколения с диэфирными донорами [2]. Ранее [3, 4] было показано, что технология получения нанесенных титан-магниевых катализаторов (ТМК) в Институте катализа СО РАН позволяет получать катализатор с требуемой активностью, изотактичностью и морфологией, т.е. близкими свойствами к коммерческим зарубежным образцам, которые, ввиду отсут-

ствия производства в России, закупаются по импорту [5, 6]. Поэтому в рамках продолжения работ по получению современных отечественных каталитических систем для жидкофазной полимеризации пропилена нами ведутся работы по синтезу и изучению закономерностей полимеризации пропилена в присутствии ТМК.

Известно, что более 50% мировых производственных мощностей полипропилена являются процессы, в которых происходит жидкофазная полимеризация (полимеризация в массе). Полимеризация пропилена в жидком мономере по сравнению с суспензионной, протекающей в гексане или гептане, показывает высокую скорость реакции из-за высокой концентрации мономера [7, 8], что является значимым преимуществом с точки зрения эффективности работы оборудования. При этом важно определить оптимальные условия реакции полимеризации пропилена в жидком мономере в присутствии ТМК, т.к. это позволит управлять процессом и получать продукт с требуемыми характеристиками.

Цель настоящей работы – исследование влияния условий полимеризации на активность и стереоспецифичность титан-магниевого катализа-

тора, а также на морфологию, реологические и молекулярные характеристики порошка полипропилена, синтезируемого в среде жидкого мономера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Титан-магниевый катализатор ИК-8-21 со средним размером 47 мкм состава $\text{TiCl}_4/\text{D}_1/\text{MgCl}_2$ (с содержанием титана 2.5 мас. % и магния – 17.7 мас. %), где D_1 – внутренний донор дибутилфталат, получали по методике, описанной в [9].

Распределение частиц катализатора по размерам определяли методом лазерной дифракции на приборе “Mastersizer 2000”.

Полимеризацию пропилена проводили в стальном автоклаве объемом 5 дм³ в среде жидкого мономера при температуре 40–90°C (обычно 70°C, 30 кгс/см²) в течение 5–120 мин (обычно 120 мин). Для полимеризации использовали пропилен полимеризационной чистоты (ПАО “Нижнекамскнефтехим”) с объемной долей основного вещества 99.8%. В качестве стандартных условий принимались: масса пропилена $m_{\text{C}_3\text{H}_6} = 1300$ г, масса навески катализатора $m_{\text{кат}} = 0.015$ г, мольное соотношение $\text{Al/Ti} = 1500$, мольное соотношение $\text{Al/D}_2 = 20$ (D_2 – циклогексилметилдиметоксисилан в качестве внешнего донора). Каталитический комплекс готовили смешением в *n*-гексане расчетного количества триэтилалюминия (ТЭА), циклогексилметилдиметоксисилана и титан-магниевого катализатора в стеклянной колбе. После ввода реагентов в колбу и перемешивания в течение 5 мин каталитический комплекс загружали в реактор при 20°C. Затем вводили пропилен и водород (обычно 0.15 моль). Далее температуру повышали до температуры основной полимеризации.

Изотактичность полипропилена (*XI*) определяли путем растворения пробы ПП в *o*-ксилоле, последующем медленном охлаждении раствора до 25°C в контролируемых условиях, отделения твердой фазы фильтрацией, выпаривании *o*-ксилола из раствора и определении доли атактической фракции ПП, растворимой в ксилоле (*XS*, мас. %); изоактичность ПП (*XI*) определяли как $XI = 100 - XS$ (мас. %).

Размер частиц порошка полипропилена определяли гранулометрическим методом на просеивающей машине “Octagon Digital” согласно ASTM D 1921, насыпную плотность порошка ПП – согласно ГОСТ 11035.1-93.

Определение показателя текучести расплава полимера (ПТР) проводили на экструзионном пластометре фирмы “Ray-Ran” в соответствии с ASTM 1238 при температуре 230°C и постоянной нагрузке 2.16 кг.

Молекулярные характеристики (МХ) образцов полипропилена определяли на высокотемпературном жидкостном гель-хроматографе “Polymerlab 220” при температуре 160°C в элюенте 1,2,4-трихлорбензол (ТХБ), при скорости потока растворителя 1 см³/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовано влияние следующих условий полимеризации: температуры, продолжительности полимеризации, концентрации водорода и мономера.

Влияние температуры полимеризации. Температура является важнейшей характеристикой процесса полимеризации олефинов. Изменение температуры оказывает значительное влияние не только на скорость процесса, но и на микроструктуру и макроструктуру образующихся полиолефинов.

Влияние температуры на процесс полимеризации ($T_{\text{пм}}$) пропилена в присутствии каталитической системы $\text{TiCl}_4/\text{ДБФ}/\text{MgCl}_2 + \text{ТЭА}/\text{циклогексилметилдиметоксисилан}$ исследовано в пределах от 40 до 90°C (табл. 1, рис. 1). Наиболее высокие значения активности катализатора при прочих равных условиях полимеризации достигаются в температурном интервале от 70 до 90°C. Так, если при температуре процесса полимеризации 40°C выход полимера составляет 10 кг ПП/г кат., то при $T_{\text{пм}}$ равной 70–90°C – на уровне 60 кг ПП/г кат. Кривая зависимости изотактичности при повышении $T_{\text{пм}}$ имеет схожий характер с изменением активности, при этом наибольшая стереоспецифичность каталитической системы достигается при 70 и 80°C. Отметим, что даже при 90°C полимер имеет высокую *XI* (97.6%).

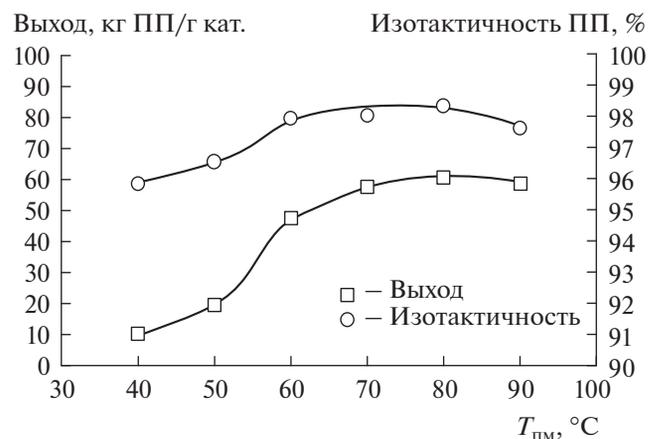


Рис. 1. Зависимость выхода и изотактичности ПП от температуры процесса полимеризации.

Таблица 1. Результаты испытаний ТМК при различных температурах процесса полимеризации

Показатель	Температура, °С ^{1) 2)}						Количество водорода в реакторе, моль ^{2) 3)}				Начальная/средняя концентрация пропилена в реакторе, г/л ^{1) 2) 3)}			Продолжительность полимеризации, мин ^{1) 3)}				
	40	50	60	70	80	90	отс.	0.15	0.21	0.31	93/61 ⁴⁾	248/172 ⁵⁾	403	5	10	30	60	120
Выход, кг ПП/г кат.	10	19	47	57	60	58	36	57	60	56	14	39	57	10	13	21	34	57
ПТР (при 2.16 кг/230°C), г/10 мин	42.7	13.0	2.4	3.9	4.1	14.5	0.4	3.9	4.8	8.2	57	8.7	3.9	4.3	4.8	4.2	3.8	3.9
Изоактичность (X), %	95.8	96.5	97.9	98.0	98.3	97.6	97.7	98.0	98.0	98.2	98.1	98.2	98.0	97.3	97.5	97.8	98.1	98.0
Среднечисленная молекулярная масса M_n ($\times 10^{-3}$), г/моль	32	40	84	91	81	59	125	91	84	77	38	59	91	77	73	93	92	91
Среднемассовая молекулярная масса M_w ($\times 10^{-3}$), г/моль	190	216	435	390	380	260	660	390	380	345	185	311	390	370	360	380	395	390
Индекс полидисперсности (M_w/M_n)	5.9	5.4	5.2	4.3	4.7	4.4	5.3	4.3	4.5	4.5	4.9	5.3	4.3	4.8	4.9	4.1	4.3	4.3
Насыпная плотность, г/см ³	0.45	0.45	0.47	0.45	0.47	0.46	0.47	0.45	0.45	0.45	0.46	0.46	0.45	0.43	0.43	0.44	0.45	0.45
Средний размер частиц порошка ПП, мкм	930	1150	1620	1720	1760	1740	1470	1720	1750	1710	1070	1510	1720	940	1030	1230	1440	1720
Содержание частиц размером менее 500 мкм, мас. %	4.8	1.1	0.4	Отс.	Отс.	0.4	3.1	Отс.	0.4	2.4	3.8	0.8	Отс.	2.8	2.4	2.0	0.4	Отс.

Условия: $m_{C_3H_6} = 1300$ г; $m_{кат} = 0.015$ г; соотношение Al/Si = 20 (мол.); соотношение Al/Ti = 1500 (мол.);¹⁾ объем водорода в реакторе — 3.5 л (0.15 моль);²⁾ $t_{пм} = 120$ мин;

3) $T_{пм} = 70^\circ\text{C}$; ⁴⁾ $m_{C_3H_6} = 300$ г и $m_{C_3H_8} = 1000$ г; ⁵⁾ $m_{C_3H_6} = 800$ г и $m_{C_3H_8} = 500$ г.

Морфология порошка полипропилена зависит от температуры полимеризации следующим образом (табл. 1): средний размер частиц ПП увеличивается с ростом $T_{\text{пм}}$, т.е. одновременно с ростом выхода ПП, при этом наибольший размер (более 1700 мкм) частиц достигается при температурах 70–90°C. С увеличением $T_{\text{пм}}$ происходит снижение количества частиц ПП размером менее 500 мкм. Порошки ПП, синтезированные на катализаторе ИК-8-21, на всем протяжении варьирования температуры полимеризации характеризуется узким гранулометрическим распределением частиц, пылевидная фракция ПП (размером менее 75 мкм) в составе порошков отсутствует, как впрочем, и при варьировании других условий полимеризации. Насыпная плотность порошков, полученных при разных температурах полимеризации, остается на высоком уровне (0.45–0.47 г/см³). Это также подтверждается данными, полученными ранее в работе [8], по исследованию влияния температуры предварительной и основной полимеризации на морфологию порошка ПП.

Исследование молекулярных и вязкостных характеристик полипропилена позволило установить, что их зависимость от температуры носит сложный характер: в случае среднemasсовой молекулярной массы (M_w) и показателя текучести расплава кривые имеют максимум и минимум в диапазоне температур 60–80°C, соответственно. В целом, отметим, что при уменьшении температуры с 90 до 60°C наблюдается увеличение M_w и, соответственно, снижение ПТР. Это согласуется со многими данными по увеличению M_w с уменьшением $T_{\text{пм}}$ при суспензионной полимеризации олефинов на разных катализаторах. Однако, при дальнейшем снижении $T_{\text{пм}}$ до 40°C неожиданно наблюдается уменьшение M_w и рост ПТР (табл. 1). Причина такого поведения системы неясна и требует дополнительного исследования. Параллельные испытания этой каталитической системы в суспензионной полимеризации пропилена в гептане при 70 и 40°C показали значения ПТР, равные 8.8 и 4.4 г/10 мин, соответственно, т.е. традиционное уменьшение ПТР при снижении $T_{\text{пм}}$. Несмотря на значительные изменения M_w и ПТР от $T_{\text{пм}}$ значения полидисперсности (M_w/M_n) изменяются в малой степени: $M_w/M_n = 4.3$ –4.7 при 70–90°C и несколько увеличиваются от 5.2 до 5.9 при снижении $T_{\text{пм}}$ от 60 до 40°C.

Полученные данные по влиянию $T_{\text{пм}}$ позволяют оценить аррениусовскую зависимость средней скорости полимеризации W_p от температуры (табл. 1). Отметим, что при варьировании $T_{\text{пм}}$ концентрация мономера C_m также изменяется, что дополнительно влияет на W_p . Это дополнительное влияние температуры на скорость полимеризации можно исключить отнесением сред-

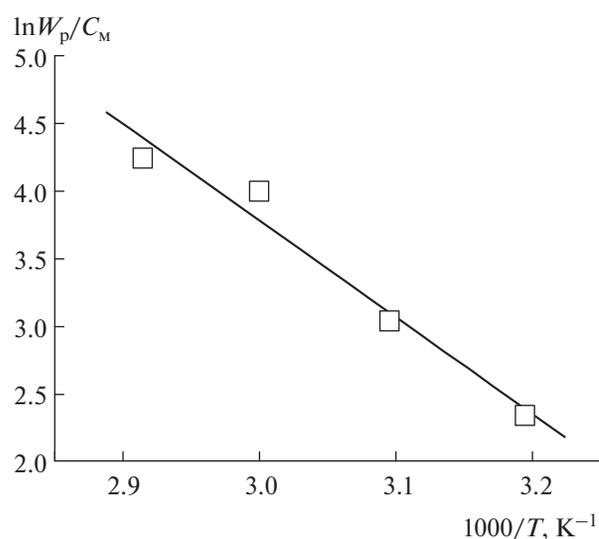


Рис. 2. Температурная зависимость W_p/C_m в аррениусовских координатах в интервале 40–70°C.

ней скорости полимеризации W_p к концентрации мономера C_m , полагая первый порядок скорости полимеризации по концентрации мономера (см. ниже соответствующий раздел). В качестве C_m мономера были использованы значения плотности жидкого пропилена, приведенные в работе [7] при 40–80°C; значение плотности при 90°C было вычислено аналогичным образом.

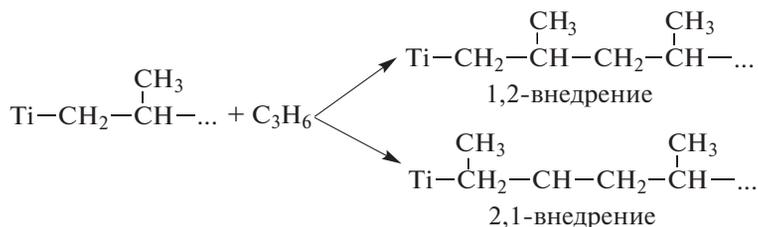
Средняя скорость полимеризации, отнесенная к концентрации мономера, W_p/C_m существенно увеличивается в интервале от 40 до 70°C и незначительно — выше 70°C. Для интервала от 40 до 70°C определена энергия активации реакции роста цепи E_a (рис. 2). Она составляет 59.6 кДж/моль или 14.2 ккал/моль. Это значение близко к литературным данным. Так, в работе [7] по данным изменения начальной скорости полимеризации в жидком пропилене от температуры в интервале 40–80°C были найдены значения E_a от 52.2 до 77.7 кДж/моль в зависимости от количества водорода в реакторе. Отметим, что авторы также нашли незначительное увеличение скорости полимеризации при увеличении температуры от 70 до 80°C.

Влияние концентрации водорода. С целью определения влияния водорода на процесс полимеризации и свойства получаемого полимера проведен ряд испытаний с водородом в количестве 0.15, 0.21 и 0.31 моля и в его отсутствии в реакционной среде. Как видно из данных (табл. 1), в случае отсутствия водорода в полимеризационной системе ТМК показывает невысокую активность, которая существенно увеличивается в присутствии водорода. Так, если без водорода выход полимера составляет 36 кг ПП/г кат., то при его введении в полимеризационную среду в количестве 0.15 моля

активность увеличивается на ~ 40% (до 57 кг ПП/г кат.). При дальнейшем увеличении содержания водорода в системе до 0.21 активность достигает максимального значения (60 кг ПП/г кат.), а повышенные количества водорода до 0.31 моля приводит к незначительному снижению активности катализатора. Изменение изотактичности ПП при варьировании количества водорода не наблюдается. Подобная зависимость активности от C_{H_2} подтверждается данными, полученными в работах

[7, 10] по исследованию влияния водорода на процесс жидкофазной полимеризации пропилена.

Экспериментальные данные показывают, что введение водорода позволяет увеличить активность на ~40%. Данное повышение активности, весьма вероятно, является результатом перехода центров, которые были дезактивированы регионерегулярным 2,1-внедрением, в активное состояние.



После регулярного 1,2-внедрения пропилена по Ti–C-связи центры остаются в активном состоянии, в то время как при 2,1-внедрении активные центры переходят в неактивное “спящее” состояние из-за пространственного затруднения между пропиленом и метильной группы растущего конца цепи у атома титана. Водород после переноса цепи с такими центрами образует связи Ti–H, которые при последующем внедрении пропилена образуют активные связи Ti–C. В результате в присутствии водорода центр переходит из “спящего” в активное состояние.

Увеличение концентрации водорода в системе ведет к ожидаемому уменьшению молекулярной массы ПП и, соответственно, росту значений ПТР из-за протекания реакции переноса цепи водородом (табл. 1). Так, если в отсутствие водорода в полимеризационной среде значения M_w и M_w/M_n составляют 660 кг/моль и 5.3, то при вводе водорода в количестве 0.15 моль значения M_w и M_w/M_n становится ниже – 390 кг/моль и 4.3, соответственно, увеличение количества до 0.31 моль приводит к дальнейшему снижению M_w (до 345 кг/моль), а полидисперность существенно не изменяется и остается на уровне 4.5. При отсутствии водорода в системе ПТР полимера равен 0.4 г/10 мин, а при содержании водорода в реакторе в количестве 0.31 моль ПТР составляет 8.2 г/10 мин.

Оценка морфологии порошка полипропилена, образующегося при разной концентрации водорода, показала, что средний размер частиц порошка ПП в отсутствие водорода в реакционной системе ниже на 15% (1470 мкм), чем для образцов ПП, полученных в присутствии водорода (более 1700 мкм). При содержании водорода 0.15 моль ко-

личество мелких фракций порошка ПП (менее 500 мкм) в полимеризационной системе образуется меньше всего.

Зависимость значений M_n от концентрации водорода позволяет определить порядок реакции переноса цепи по концентрации водорода (n) и константу скорости переноса цепи с водородом ($k_{\text{пер}}^H$) по известному уравнению: $42/M_n - 42/M_{\text{но}} = k_{\text{пер}}^H \cdot C_{H_2}^n / k_p \cdot C_m$, где $M_{\text{но}}$ – молекулярная масса ПП в опыте без водорода; k_p – константа скорости роста; C_m и C_{H_2} – концентрация мономера и водорода в уравнении, соответственно.

Рис. 3 показывает зависимость полученных значений M_n от концентрации водорода согласно указанному уравнению в логарифмических координатах, которая дает дробное значение порядка реакции $n = 0.7$.

Данные о дробном порядке реакции переноса цепи по концентрации водорода ранее наблюдались при полимеризации в гептане и подробно рассматривались ранее в работе [11]. Для определения значений $k_{\text{пер}}^H$ в этом случае правильно использовать зависимость $42/M_n - 42/M_{\text{но}}$ от концентрации водорода в обратных координатах согласно следующему уравнению:

$$\begin{aligned}
 (42/M_n - 42/M_{\text{но}})^{-1} = & k_p C_m (k_{\text{миг}})^{-1} + \\
 & + k_p C_m (k_{\text{пер}}^H C_{H_2})^{-1},
 \end{aligned}$$

где M_n и $M_{\text{но}}$ – среднечисловая молекулярная масса ПП в присутствии и отсутствии водорода соответственно; k_p – константа скорости роста; $k_{\text{миг}}$ – константа скорости миграции растущего конца

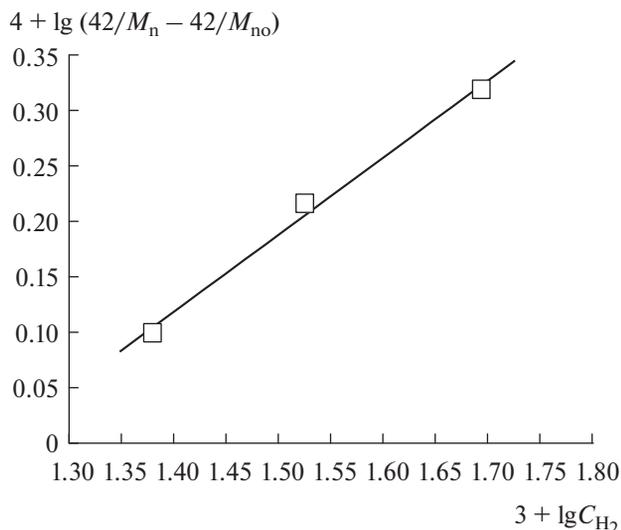


Рис. 3. Зависимость $42/M_n - 42/M_{no}$ от C_{H_2} в логарифмических координатах.

цепи; $k_{пер}^H$ — константа скорости реакции переноса цепи с водородом;

Рис. 4 показывает зависимость $(42/M_n - 42/M_{no})^{-1}$ от $C_{H_2}^{-1}$ и позволяет найти значения констант $k_{пер}^H$ и $k_{миг}$.

По данным рис. 4 и вышеприведенному уравнению получаем:

1) $k_p C_M (k_{пер}^H)^{-1} = 147$, тогда, полагая $k_p = 2500$ л/(моль с) [11] и $C_M = 9.6$ моль/л, получаем $k_{пер}^H = (2500 \times 9.6)/147 = 163$ л/(моль с), что существенно ниже k_p ;

2) $k_p C_M (k_{миг})^{-1} = 1790$, тогда $k_{миг} = (2500 \times 9.6)/1790 = 13.4$ с⁻¹ (по сравнению с примерно 4 с⁻¹ при полимеризации в гептане).

Влияние концентрации мономера. В экспериментах с пониженной концентрацией мономера объем жидкой фазы в реакторе сохраняли постоянным добавлением пропана (табл. 1). С повышением концентрации пропилена происходит увеличение производительности катализатора с выходом на плато. Так, если при средней концентрации мономера 61 г/л выход составляет 14 кг ПП/г катализатора, то при C_M , равной 172 г/л, — 39 кг ПП/г катализатора, а при $C_M = 403$ г/л выход повышается до 57 кг ПП/г катализатора. Видно, что при увеличении средней концентрации мономера до 172 г/л выход ПП линейно возрастает с увеличением C_M , т.е. наблюдается первый порядок скорости полимеризации по концентрации мономера. При дальнейшем увеличении C_M рост выхода ПП замедляется. При этом XI ПП независимо от концентрации пропилена в реакторе остается на вы-

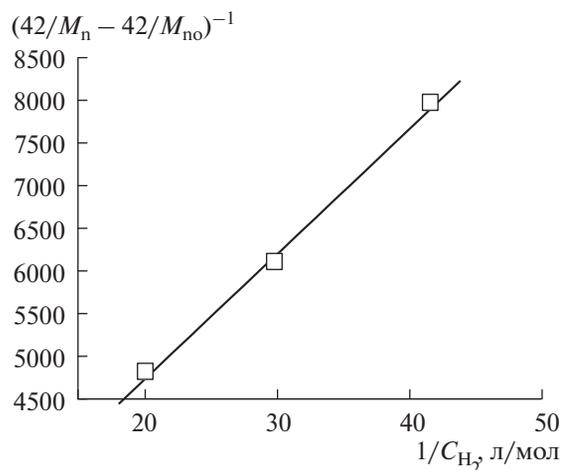


Рис. 4. Зависимость $(42/M_n - 42/M_{no})^{-1}$ от $C_{H_2}^{-1}$.

соком уровне (98.0–98.2%). Средний размер частиц с увеличением концентрации мономера повышается с 1130 до 1720 мкм (табл. 1), доля фракции ПП менее 500 мкм напротив снижается. При снижении концентрации мономера наблюдается уменьшение M_w (с 390 до 185 кг/моль) и рост значений ПТР (с 3.9 до 57 г/10 мин), соответственно. Это обусловлено увеличением соотношения концентраций C_{H_2}/C_M , т.к. C_{H_2} постоянна, а C_M снижается. При этом значения M_w/M_n изменяются незначительно (с 4.3 до 5.2).

Влияние продолжительности полимеризации.

Табл. 1 представляет результаты опытов с разным временем полимеризации. С увеличением продолжительности синтеза от 5 до 120 мин выход полимера возрастает с 10 до 57 кг с 1 г катализатора, XI повышается с 97.3 до 98.0%, насыпная плотность — с 0.43 до 0.45 г/см³, размер частиц по-

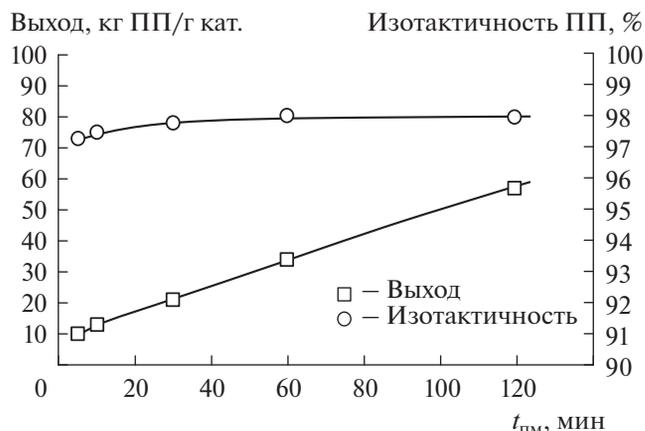


Рис. 5. Зависимость выхода и изотактичности ПП от продолжительности процесса полимеризации.

рошка ПП увеличивается с 940 до 1720 мкм, а доля частиц размером менее 500 мкм снижается с 2.8% вплоть до отсутствия.

Зависимость выхода полимера и изотактичности полипропилена от продолжительности процесса полимеризации ($t_{\text{пм}}$) представлена на рис. 5. Как видно из рис. 5, выход ПП линейно растет с увеличением $t_{\text{пм}}$. Это указывает на стабильность активности катализатора со временем полимеризации. При этом с ростом выхода ПП одновременно происходит увеличение среднего размера частиц порошка ПП и уменьшение количества мелкой фракции порошка ПП (табл. 1).

С увеличением $t_{\text{пм}}$ происходит незначительное увеличение M_w (с 370 до 390 кг/моль) и слабое уменьшение значений ПТР (с 4.3 до 3.9 г/10 мин), соответственно, полипропилена, а также некоторое сужение ММР (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние условий полимеризации (температуры, продолжительности полимеризации, концентрации мономера и водорода) на процесс полимеризации пропилен в жидком мономере в присутствии каталитической системы $\text{TiCl}_4/\text{ДБФ}/\text{MgCl}_2 + \text{ТЭА}/\text{циклогексилметилдиметоксисилан}$. Показано, что варьирование условий процесса полимеризации пропилен в изученных интервалах приводит к изменению активности титан-магниевого катализатора и характеристик образующегося полипропилена. Установлены кинетические параметры процесса полимеризации пропилен в жидком мономере для исследуемой каталитической системы.

Наиболее высокие значения активности в полимеризационной системе наблюдаются для температур 70–90°C, концентрации мономера 403 г/л в присутствии водорода (0.15 моль в исследованных условиях). При указанных условиях полимеризации порошок полипропилена характеризуется оптимальными характеристиками по насыпной плотности и морфологии, т.е. высоким значением среднего размера частиц и отсутствием пылевидной фракции. Изотактичность ПП в небольшой степени увеличивается с ростом температуры, концентрации водорода и продолжительности процесса полимеризации. Что касается молекулярных характеристик образующегося ПП, то снижение

температуры процесса и содержания водорода, увеличение продолжительности полимеризации и содержания мономера приводит к увеличению средних молекулярных масс, при этом, показатель текучести расплава, напротив, уменьшается. Молекулярно-массовое распределение образцов ПП с увеличением температуры, продолжительности процесса и концентрации водорода незначительно сужается.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют выбрать оптимальные условия проведения синтеза полипропилена в жидком мономере для исследуемой каталитической системы, а выявленные параметры процесса эффективно управлять молекулярными и реологическими характеристиками ПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clifford Lee.* // The 6th Sinopec International Conference on Catalysis Technology, Dalian, 2016.
2. *Pater J.T.M.* // IX Международная научно-практическая конференция “Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии”, Нижнекамск, 2016.
3. *Салахов И.И., Батыршин А.З., Сергеев С.А., Букатов Г.Д., Барабанов А.А., Сахабутдинов А.Г., Захаров В.А., Гильманов Х.Х.* // Катализ в промышленности. 2014. Т 6. № 3. С. 198.
4. *Салахов И.И., Батыршин А.З., Сергеев С.А., Букатов Г.Д., Барабанов А.А., Мацько М.А., Сахабутдинов А.Г., Захаров В.А.* // Катализ в промышленности. 2016. № 16. С. 30.
5. *Salvatore Ali.* Recent advances to Basell avant PP catalyst systems // Maack PP World Congress. 2004, Zurich C.H. 2004, Sept. 13–15. Session 6/2–10, 2–26.
6. Basell будет поставлять катализатор полимеризации пропилен на “Полиом” // Отраслевой электронный портал Plastinfo.ru. URL: http://plastinfo.ru/information/news/13337_18.07.2011 (дата обращения 20.10.13.).
7. *Pater J.T.M., Weickert G., Swaaij van W.P.M.* // Chemical Engineering Science. 2002. P. 3461.
8. *Pater J.T.M., Weickert G., Swaaij van W.P.M.* // J. of Applied Polymer Science. 2003. V. 87. P. 1421.
9. *Сергеев С.А. Букатов Г.Д., Захаров В.А.* // Патент РФ № 2191196. 2002.
10. *Samson J.J.C., Bosman P.J., Weickert G., Westerterp K.R.* // J. of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. 1999. V. 37. P. 219.
11. *Букатов Г.Д., Сергеев С.А., Захаров В.А., Ечевская Л.Г., Мацько М.А.* // Катализ в промышленности. 2011. Т. 3. № 1. С. 14.