

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМОВАНИЯ НА НАКРАШИВАЕМОСТЬ ГЕЛЬ-ВОЛОКОН ИЗ СОПОЛИМЕРОВ АКРИЛОНИТРИЛА, МЕТИЛАКРИЛАТА И ИТАКОНОВОЙ КИСЛОТЫ

STUDY OF THE INFLUENCE OF FORMATION CONDITIONS ON DYEABILITY OF GEL-FIBERS MADE FROM COPOLYMERS OF ACRYLONITRILE, METHYL ACRYLATE AND ITACONIC ACID

УДК 677.494.745.32 : 677.027.423

Н.В. Пчелова*, Л.А. Щербина, И.С. Горднякова,
И.А. Будкоте

Могилевский государственный университет
продовольствия

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2020-13912>

N. Pchelova*, L. Shcherbina, I. Haradniakova,
I. Budkute

Mogilev State University of
Food Technologies

РЕФЕРАТ

СОПОЛИМЕР, АКРИЛОНИТРИЛ, МЕТИЛАКРИЛАТ, ИТАКОНОВАЯ КИСЛОТА, ДИМЕТИЛФОРМАМИД, ФОРМОВАНИЕ, НАКРАШИВАЕМОСТЬ, ИНДЕКС БЕЛИЗНЫ

Целью работы явилось изучение влияния содержания кислотного сомономера и условий формования на крашиваемость гель-волокон на основе сополимеров акрилонитрила (АН), метилакрилата (МА) и итаконовой кислоты (ИмК). Синтезированы модельные сополимеры АН, МА и ИмК с содержанием кислотного сомономера в мономерной смеси от 0 до 2 % (масс.) за счет изменения доли МА. Оценка корреляции между загрузкой кислотного мономера в реактор и реальным количеством этого же мономера, вступившего в реакцию сополимеризации, осуществлялась по сорбции красителя метиленового голубого пленками модельных сополимеров. Установлено, что содержание ИмК в сополимере оказывается ниже, чем содержание ИмК в исходной полимеризационной смеси. С использованием стандовой прядильной установки на основе синтезированных сополимеров получены по диметилформамидному способу образцы модельных волокон.

Исследование крашиваемости полиакрилонитрильных волокон в гель-состоянии показало, что количество сорбированного красителя прямо пропорционально содержанию ИмК в сополимере и не зависит от температуры оса-

ABSTRACT

COPOLYMER, ACRYLONITRILE, METHYL ACRYLATE, ITACONIC ACID, DIMETHYLFORMAMIDE, FORMATION, COLORABILITY, WHITENESS INDEX

The aim of this work was to study the effect of the acid comonomer content and the spinning conditions on the coloring of gel fibers based on copolymers of acrylonitrile (AN), methyl acrylate (MA), and itaconic acid (ITA). Model copolymers AN, MA, and ITA with an acid comonomer content in the monomer mixture from 0 to 2 % (weight) due to a change in the MA fraction were synthesized. The correlation between the loading of the acid monomer into the reactor and the real amount of the same monomer that entered the copolymerization reaction was estimated by the sorption of methylene blue dye by films of model copolymers. It was found that the content of ITA in the copolymer is lower than the content of ITA in the initial polymerization mixture. Using a bench spinning machine based on the synthesized copolymers, samples of model fibers were obtained by the dimethylformamide method.

The study of the coloring of polyacrylonitrile fibers in the gel state showed that the amount of sorbed dye is directly proportional to the content of ITA in the copolymer and does not depend on the temperature of the precipitation bath. It was found that the whiteness index (lightness) practically does not depend on the temperature of the precipitation bath, but to a greater extent is determined by the content

* E-mail: verkhautsova@mail.ru (N. Pchelova)

дительной ванны. Установлено, что индекс белизны (светлота) практически не зависит от температуры осадительной ванны, а в большей степени определяется содержанием кислотного сомономера в сополимере. Максимальное снижение индекса белизны наблюдается при повышении содержания **ИмК** в сополимере от 0 до 0,7 %. Дальнейшее увеличение этого показателя до 1,79 % приводит к практически линейному снижению индекса белизны с 11–14 до 7,4–7,8 %.

*of acidic comonomer in the copolymer. The maximum decrease in the whiteness index is observed with an increase in the content of **ITA** in the copolymer from 0 to 0.7 %. A further increase in this indicator to 1.79 % leads to an almost linear decrease in the whiteness index from 11–14 to 7.4–7.8 %.*

Одним из важных свойств полиакрилонитрильных (ПАН) волокон текстильного назначения является их способность окрашиваться катионными красителями. Известно, что в зависимости от композиционного состава волокнообразующего сополимера и способа изготовления получают ПАН волокна с различными свойствами и особенностями в отношении окрашивания различными классами красителей. Наиболее многочисленную группу среди ПАН волокон представляют волокна на основе сополимеров акрилонитрила (**АН**), содержащих кислотные сомомеры (итаконую кислоту (**ИмК**), 2-акриламид-2-метилпропансульфо кислоту (**АМПС**), акриловую кислоту и др.) [1–5]. Эти волокна отличаются повышенным сродством к основным красителям.

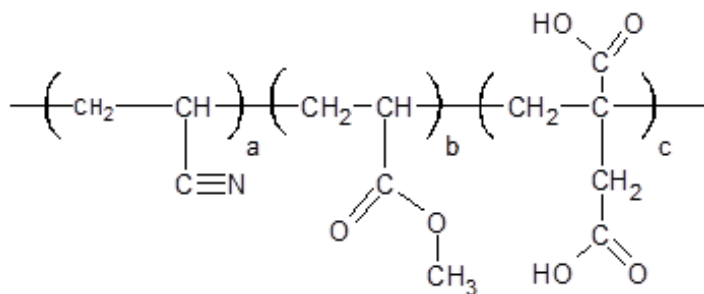
Несмотря на значимость того факта, что растворитель может оказывать существенное влияние на формирование структуры и профиля формируемых волокон, в открытом доступе практически отсутствует информация о том, какие изменения структурно-морфологических свойств волокон будут происходить при замене одного кислотного сомономера на другой, а также при изменении его содержания в сополимере (при использовании практически любого из растворителей).

С целью расширения ассортимента волокнистых материалов текстильного и специального назначения, а также с целью разработки путей повышения экономической эффективности и сырьевой «независимости» завод «Полимир» ОАО «Нафтан» рассматривает вопрос о возможности замены кислотного сомономера **АМПС** на **ИмК** при производстве волокна марки ни-

трон Д по диметилформамидному методу. В настоящее время реализованный на данном предприятии технологический процесс производства ПАН волокна на основе [**АН-co-МА** (метилакрилат)-**co-АМПС**] предусматривает использование в качестве растворителя диметилформамида (**ДМФ**). Анализ имеющейся в открытых источниках научно-технической информации не позволил обнаружить материалы, позволяющие как организовать технологический процесс производства волокна на основе поли[**АН-co-МА-co-ИмК**] по диметилформамидному методу, так и ответить на вопросы, каково должно быть оптимальное содержание **ИмК** в сополимере, какие режимы необходимы для формования таких волокнистых материалов и каковы будут их свойства.

Целью данной работы является исследование и анализ влияния композиционного состава сополимера, состава и температуры осадительной ванны на окрашиваемость волокон, получаемых по диметилформамидному методу из сополимеров **АН**, **МА** и **ИмК** при варьировании содержания последней 0 до 2 % (*масс.*) от массы мономеров при загрузке в реактор).

Для оптимизации содержания **ИмК** в поли[**АН-co-МА-co-ИмК**] проведена серия синтезов данных сополимеров, в ходе которых варьировалось количество **ИмК** от 0 до 2 % (*масс.*) за счет изменения доли **МА**. Для проведения экспериментальных работ методом гомофазной полимеризации синтезированы следующие образцы волокнообразующих сополимеров на основе **АН**, **МА** и **ИмК**:



- поли[АН (91)-co-МА (9)];
- поли[АН (91)-co-МА (8,5)-co-ИтК (0,5)];
- поли[АН (91)-co-МА (8,3)-co-ИтК (0,7)];
- поли[АН (91)-co-МА (8,1)-co-ИтК (0,9)];
- поли[АН (91)-co-МА (8,0)-co-ИтК (1,0)];
- поли[АН (91)-co-МА (7,8)-co-ИтК (1,2)];
- поли[АН (91)-co-МА (7,5)-co-ИтК (1,5)];
- поли[АН (91)-co-МА (7,0)-co-ИтК (2,0)].

Для нахождения корреляции между загрузкой кислотного мономера в реактор и реальным количеством этого же мономера, вступившего в реакцию сополимеризации, важно определить фактические значения содержания **ИтК** в сополимере, по сравнению с его количеством в реакционной смеси (**РС**).

С этой целью было проведено крашение красителем метиленовым голубым пленок, полученных из синтезированных образцов сополимеров [6]. На рисунке 1 приведены результаты определения содержания **ИтК** в модельных сополимерах.

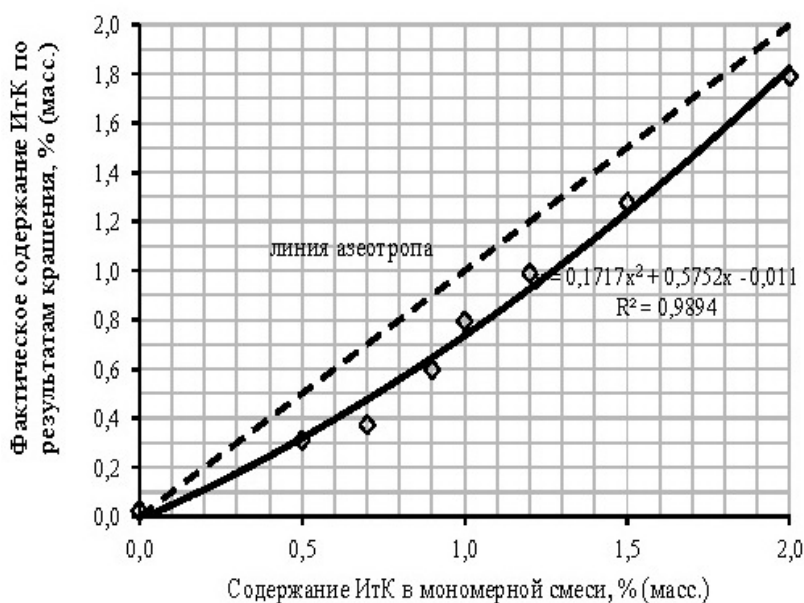


Рисунок 1 – Результаты определения содержания итаконовой кислоты (по сорбции красителя метиленового голубого) в образцах поли[АН-co-МА-co-ИтК]

Установлено, что содержание **ИмК** в сополимере ниже, чем его содержание в исходной мономерной смеси, по-видимому, по причине пониженной относительной реакционной способности в процессах присоединения к макрорадикалам на этапе роста цепи [6].

Для определения влияния содержания **ИмК** в поли[АН-со-МА-со-ИмК] на свойства полиакрилонитрильных волокон, полученных из диметилформамидных прядильных растворов данных сополимеров с помощью стеновой прядильной установки, сформованы модельные волокна в соответствии с условиями, представленными в таблице 1.

Малая прядильная установка (рисунок 2) представляет собой агрегат, включающий узел дозировки прядильного раствора – механизм толкателя (2, 3, 4), механизм галет (10, 11, 14, 15), механизм приема нити (16, 17, 18). Процесс нитеобразования происходит в ванне 6, а ориентационная (пластификационная) вытяжка – в пластификационной ванне 12.

Последовательность работы прядильной установки следующая. На шприц 4 навинчивали фильтрный комплект 5. Обезвоздушенный прядильный раствор заливали в шприц 4, который помещали в гнездо корыта осадительной ванны. Подача прядильного раствора через фильтрный

Таблица 1 – Условия формования модельных образцов

Способ формования	мокрый
Растворитель	ДМФ
Концентрация растворителя в осадительной ванне, %	0; 55
Температура осадительной ванны, °С	5, 15, 35
Температура пластификационной ванны, °С	95,5
Количество отверстий в фильтре, шт.	120
Пластификационная ванна	вода
Кратность пластификационного вытягивания	5

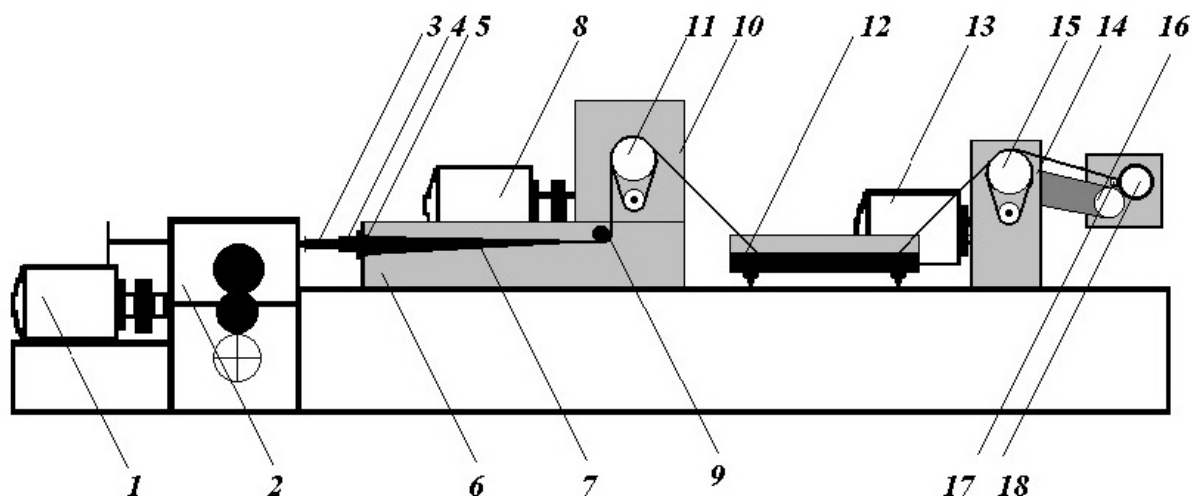


Рисунок 2 – Прядильная установка (МУЛ-1): 1, 8, 13 – электропривод; 2, 10, 14 – редукторы; 3 – шток; 4 – шприц; 5 – фильтрный комплект; 6 – корыто для осадительной ванны; 7 – формируемая нить; 9 – нитепроводник; 11, 15 – пара вытяжных галет; 12 – пластификационная ванна – «утюг»; 16 – фрикцион; 17 – нитеводитель; 18 – бобина с нитью

комплект осуществлялась поступательным движением штока 3,двигаемого толкателем. Равномерное поступательное движение толкатель получает от электродвигателя 1 через редуктор 2.

Вытекающие из фильеры струйки прядильного раствора поступали в осадительную ванну 6, осаждались и, проходя через направляющую палочку 9, принимались на галету 11. Далее волокно подвергали пластификационной вытяжке между галетами 11 и 15 в ванне 12 и наматывали на бобину 18, вращаемую фрикционом 16. Нарботанное волокно (на бобине) помещали в дистиллированную воду для его полной отмывки от остаточного растворителя. Галета 11 имеет отдельный привод, состоящий из электродвигателя 8 и редуктора 10. Вытяжная галета 15 и бобина 18 получают вращение от одного общего электродвигателя 13 через редуктор 14. Скорость вращения бобины 18 и вытяжной галеты 15 изменяются синхронно. Изменение подачи раствора, скорости вращения галет осуществляли путем смены шестерен в редукторах. Перед каждым экспериментом по формованию необходимо проверять точность подачи раствора через фильеру путем отбора проб раствора в

градуированный цилиндр.

Свежесформованные ПАН гель-волокна промывали на перфорированной бобине периодическим способом при гидромодуле не менее 100. Количество промывок составляло не менее 5. Каждая промывка длилась не менее 1 ч. Промывку вели до остаточного содержания растворителя в волокне не более 0,1 %. В качестве осадительных ванн были испытаны дистиллированная вода и 55 % водный раствор ДМФ. Температура осадительной ванны составляла 5, 15 и 35 °С.

На рисунке 3 представлены результаты изучения влияния условий нитеобразования на количество красителя метиленового голубого (% (масс.)), сорбированного свежесформованным гель-волокном на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК] при его формовании из диметилформамидных прядильных растворов в указанные осадительные ванны с температурой осадительной ванны 5, 15 и 35 °С.

Из данных, представленных на рисунке 3, следует, что при формовании волокон на основе сополимеров АН количество сорбированного красителя фактически прямолинейно зависит от

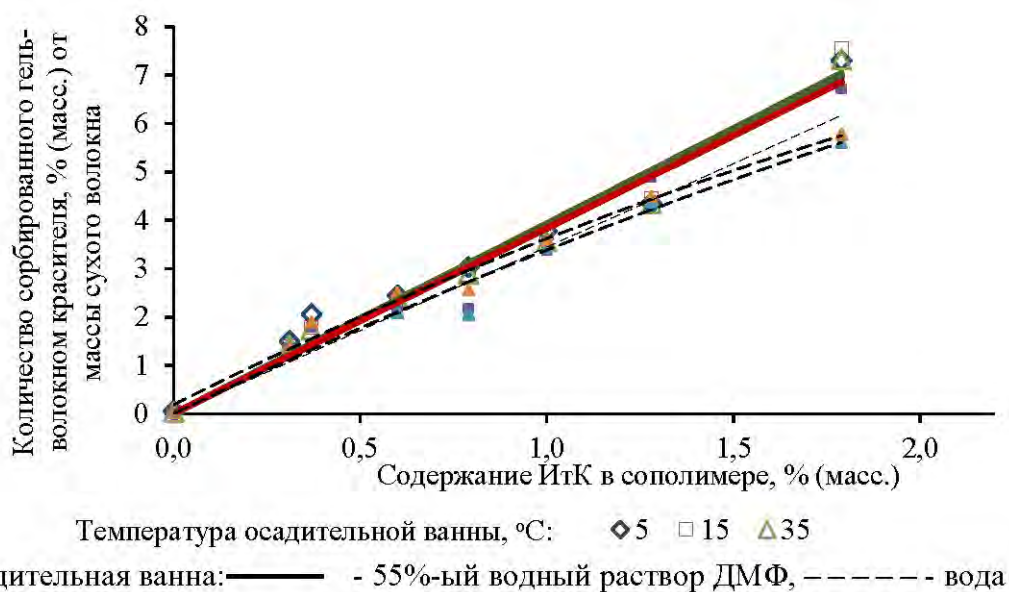


Рисунок 3 – Влияние содержания **ИтК** в сополимере на количество красителя метиленового голубого (% (масс.) от массы волокна), сорбированного гель-волокном, при проведении процесса формования в 55 % водный раствор ДМФ и воду с температурой 5, 15, 35 °С

содержания кислотных групп в волокнообразующем сополимере и не коррелирует (в пределах ошибки измерения) с условиями формования и достоверно не зависит от температуры осадительной ванны.

Сопоставление данных (рисунок 3) о сорбции красителя волокнами, сформованными в воду и 55 % водный раствор **ДМФ**, указывает на то, что среднее значение красителя, сорбированного волокном, сформованным в воду, ниже, что может быть объяснено более плотной надмолекулярной структурой, образуемой в результате спинодального распада системы «полимер – растворитель».

Внешний вид воздушно-сухих образцов ПАН волокон, сформованных при различных температуре и составе осадительной ванны (дистиллированная вода и 55 % водный раствор ДМФ) и окрашенных в гель-состоянии красителем метиленовым голубым, позволяет сделать вывод, что по мере увеличения содержания **ИмК** в сополимерах глубина окрашивания волокон на их основе увеличивается.

С помощью программ для обработки фотографических изображений были определены усредненные условные цветовые координаты для каждого из образцов окрашенных волокон.

Колористическую оценку окрашенных образцов волокон проводили по экспресс-мето-

дике, разработанной на кафедре химической технологии высокомолекулярных соединений Могилевского государственного университета продовольствия. Для этого все окрашенные образцы волокон сканировали на белом фоне с использованием фотосканера. Далее цветовая характеристика по цифровому изображению каждого образца усреднялась путем программы размытия изображений и определялся ее средний (из 10 точек) показатель в координатах **RGB**. Любой цвет в модели **RGB** образуется путем смешения в различных пропорциях этих трех базовых цветов. Каждый цвет в данной модели описывается тремя цифровыми значениями от 0 (минимальная интенсивность) до 255 (максимальная интенсивность).

В трехмерной системе координат цветовую модель можно представить в виде куба (рисунок 4).

Так, чистый синий цвет может быть определен как (0, 0, 255), красный – (255, 0, 0), ярко-фиолетовый – (255, 0, 255), чёрный – (0, 0, 0), а белый – (255, 255, 255).

С целью оценки общей интенсивности окраски каждого образца средние значения координат (**R**, **G**, **B**) суммировали ($R + G + B$). Для белого цвета сумма (R, G, B) = 255 + 255 + 255 = 765. Так как в данном случае красилось «условно белое» волокно (то есть имеющее сумму (**R**, **G**,

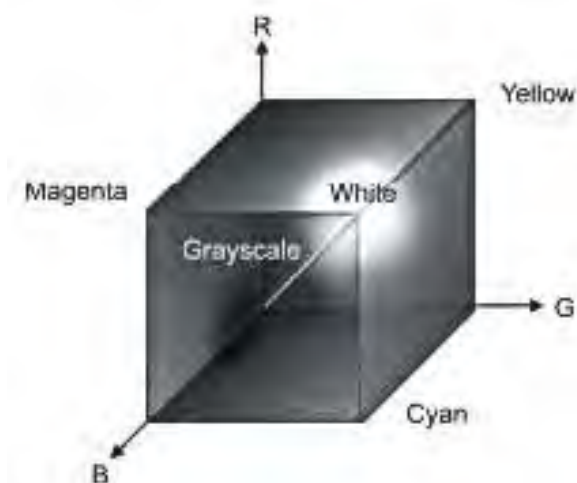


Рисунок 4 – Представление цветовой модели **RGB**

B), близкую к 765), то при крашении сумма (**R**, **G**, **B**) должна уменьшаться. То есть, чем меньше интенсивность окраски, тем ближе сумма значений (**R**, **G**, **B**) к 765.

По формуле находили индекс белизны (светлоты), **x**, % (от чисто белого):

$$x = \frac{(R + G + B)}{765} \cdot 100\% \quad (1)$$

По уменьшению значения **x** контролировали интенсивность окраски экспериментальных образцов окрашенного волокна (чем выше значение **x**, тем хуже окрашивается образец нити).

С целью снижения субъективности колористической оценки результатов крашения волокон для каждого из образцов был рассчитан индекс белизны. Результаты расчётов проиллюстрированы на рисунках 5–8.

Данные, проиллюстрированные на рисунках 5–8, свидетельствуют о том, что индекс белизны (светлоты) для волокон, сформованных в воде, изменяется аналогично изменению этого показателя для волокон, сформованных в 55 %

водном растворе **ДМФ**. Индекс белизны в значительной степени определяется содержанием кислотного сомономера в сополимере. Максимальное, практически линейное, снижение индекса белизны (светлоты) наблюдается при повышении содержания **ИмК** от 0 до 0,7 %. В дальнейшем наблюдается незначительное снижение индекса белизны с 11–14 до 7,4–7,8 %. В случае поли[**АН-со-МА**] использование в качестве осадительной ванны воды обеспечивает лучшую крашиваемость получаемому волокну, по сравнению с волокном, сформованным в 55 % водный раствор **ДМФ**, что связано, по-видимому, с образованием менее плотной структуры. Также в случае водной осадительной ванны более заметно влияние ее температуры на индекс белизны. При условии нитеобразования волокон при 35 °С они характеризуются несколько лучшей крашиваемостью, по сравнению с волокнами, сформованными при 5 и 15 °С. Вероятно, более «жесткие» условия нитеобразования, вызывая быстрое осаждение полимера, препятствуют в определенной степени более плотной упаковке макромолекул в филаментах.

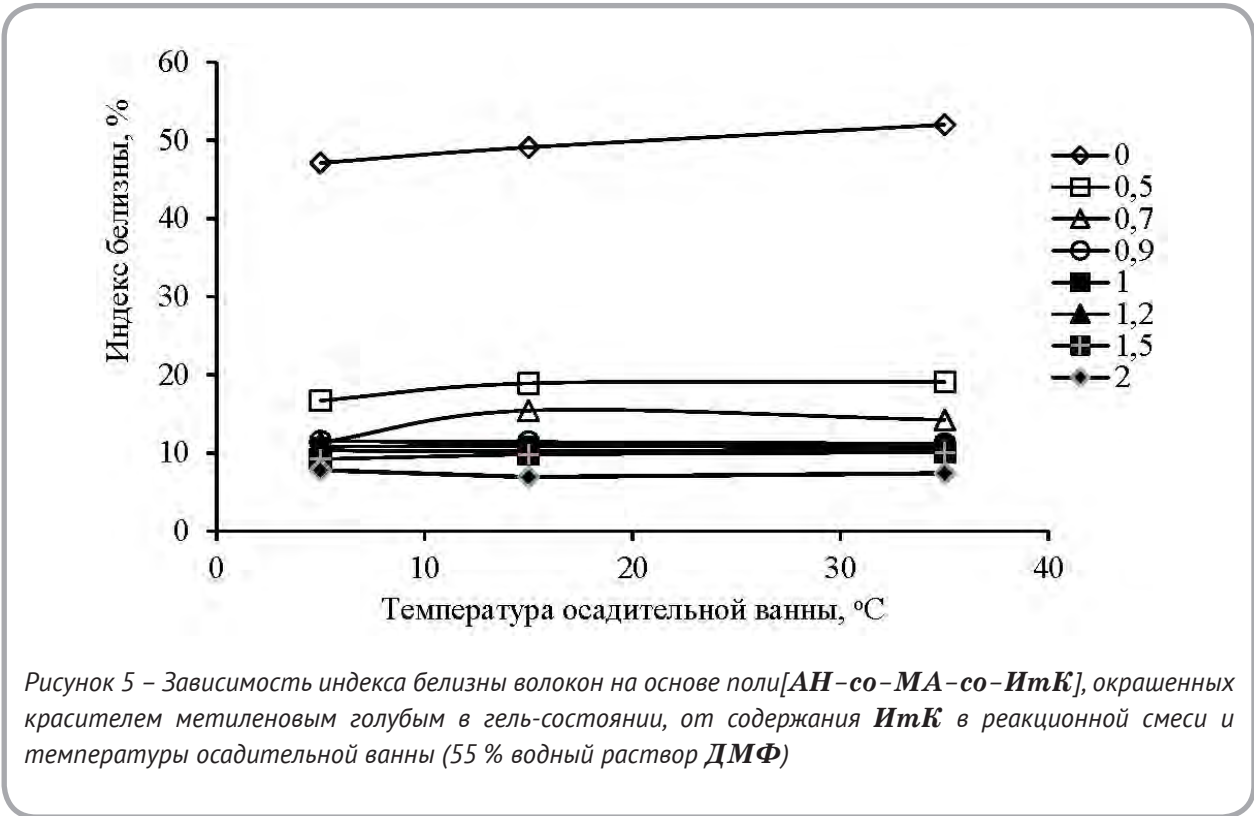


Рисунок 5 – Зависимость индекса белизны волокон на основе поли[**АН-со-МА-со-ИмК**], окрашенных красителем метиленовым голубым в гель-состоянии, от содержания **ИмК** в реакционной смеси и температуры осадительной ванны (55 % водный раствор **ДМФ**)

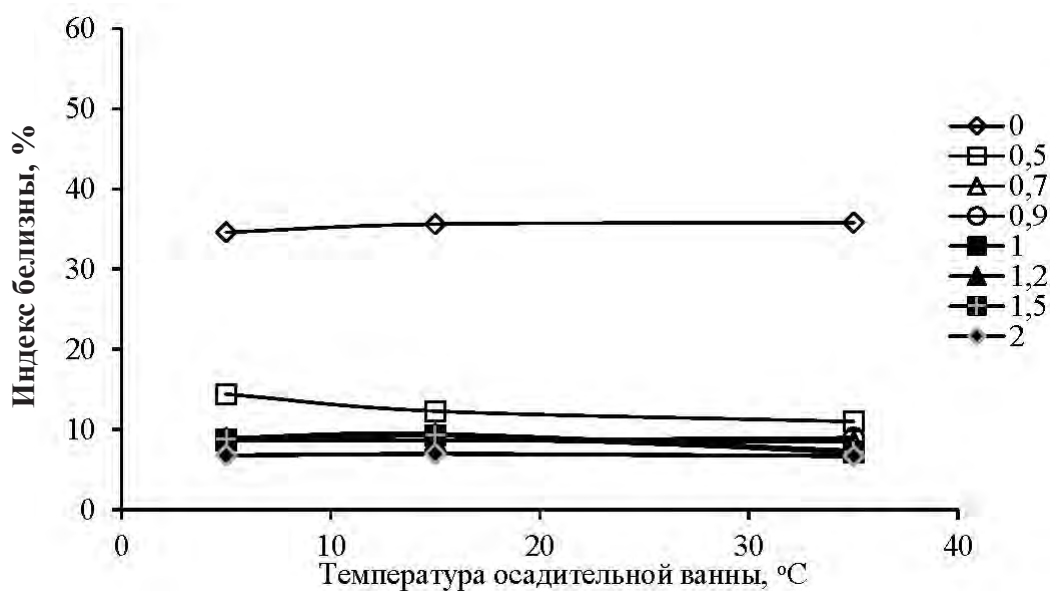


Рисунок 6 – Зависимость индекса белизны волокон на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК], сформованных в воду и окрашенных красителем метиленовым голубым в гель-состоянии, от содержания **ИтК** в реакционной смеси и температуры осадительной ванны

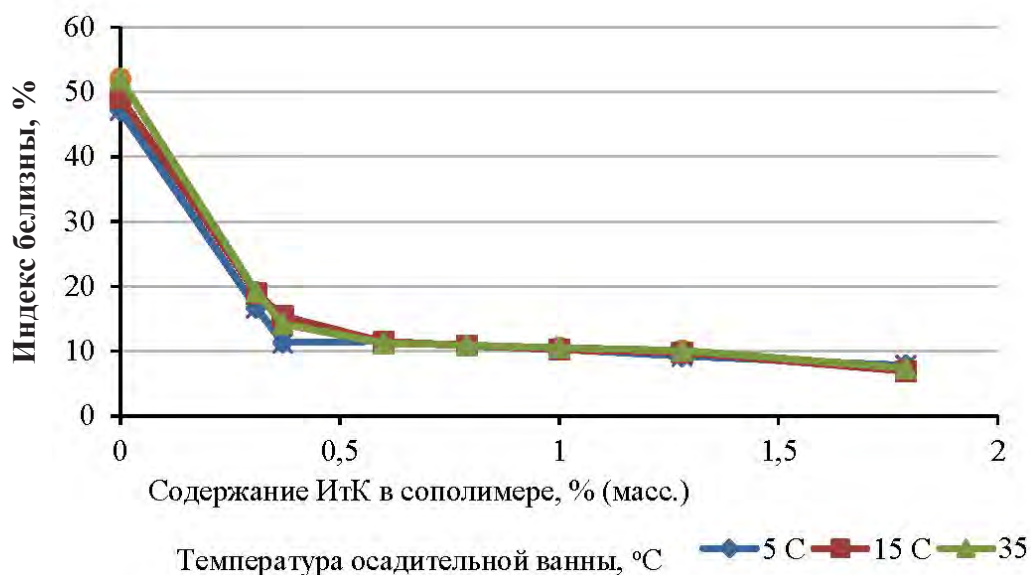


Рисунок 7 – Зависимость индекса белизны волокон на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК], окрашенных красителем метиленовым голубым в гель-состоянии, от содержания **ИтК** в сополимере (осадительная ванна – 55 % водный раствор ДМФ с температурой 5, 15, 35 °C)

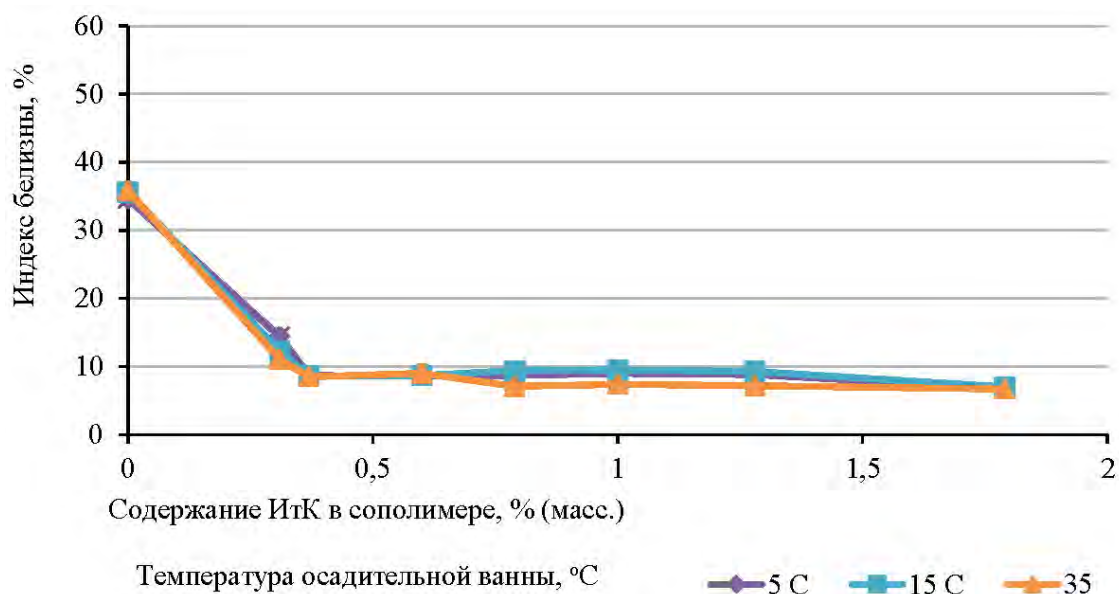


Рисунок 8 – Зависимость индекса белизны волокон на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК], окрашенных красителем метиленовым голубым в гель-состоянии, от содержания **ИтК** в сополимере (осадительная ванна – вода с температурой 5, 15, 35 °C)

В процессе проведения экспериментов было обращено внимание на то, что волокнистые материалы, получаемые на основе модельных сополимеров, в ряде случаев отличались жестким грифом. В связи с этим был проведен анализ окрашенных волокон на основе тактильных ощущений и каждому из образцов выставлена (возможно, необъективная) оценка в условных баллах от 1 (самый мягкий) до 10 (самый жесткий). На рисунках 9 и 10 приведены результаты сравнительного анализа жесткости окрашенных образцов.

Данные, представленные на рисунках 9 и 10, свидетельствуют, что при проведении нитеобразования в 55 % водный раствор ДМФ получают волокна с более мягким грифом, что обусловлено более «мягкими» условиями этого процесса. Если волокна на основе поли[АН-со-МА] и поли[АН-со-МА-со-ИтК], содержащие минимальное количество **ИтК**, в гель-состоянии были изначально жесткими, то волокна на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК (2)] приобретали жесткость после их крашения в гель-состоянии. По-видимому, причиной повышенной жесткости волокон на основе сопо-

лимеров, содержащих минимальное количество **ИтК**, является их низкая гидрофильность. Причиной повышения жесткости волокон, содержащих 1,5–2,0 % **ИтК**, в результате крашения является повышенная способность их структуры к релаксации в ходе сушки, следующей за крашением, при температуре 105 °C.

ВЫВОДЫ

С целью получения данных о влиянии композиционного состава сополимеров состава и температуры осадительной ванны на профиль волокон, получаемых из сополимеров акрилонитрила (АН), метилакрилата (МА) и итаконовой кислоты (ИтК) по диметилформамидному методу, синтезированы гомофазным методом образцы поли[АН-со-МА-со-ИтК], содержащие различное количество кислотного сомономера (от 0 до 2 % от массы мономеров в реакционной смеси). При проведении исследований из прядильных растворов в диметилформамиде (ДМФ) с использованием водных осадительных ванн, содержащих 0 и 55 % ДМФ, с температурой 5, 15 и 35 °C сформованы образцы модельных волокон на основе образцов поли[АН-со-МА-со-ИтК].

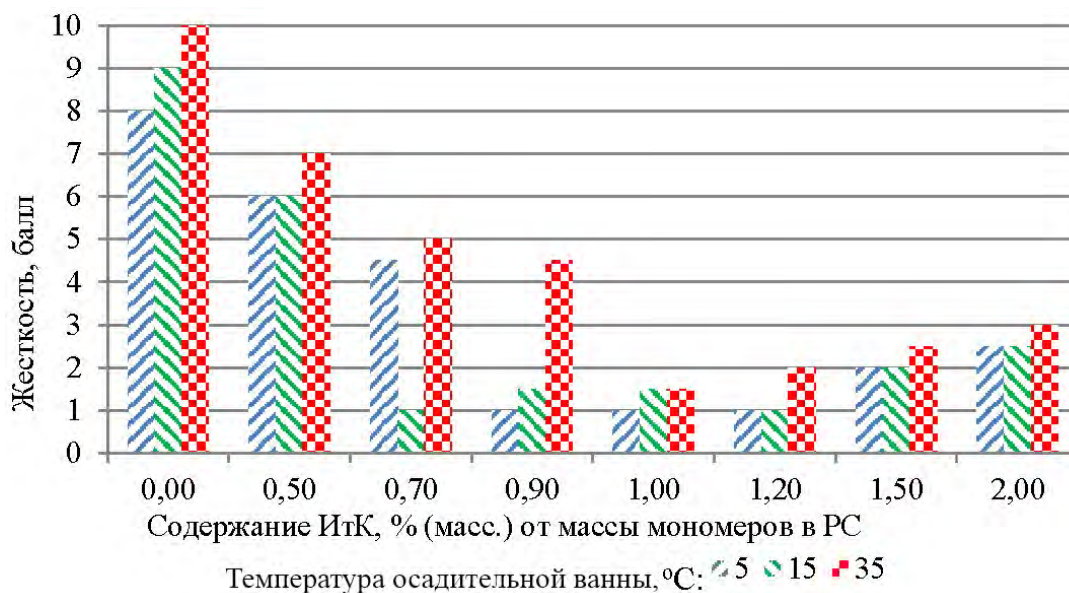


Рисунок 9 – Влияние на жесткость окрашенных волокон на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК] содержания **ИтК** в мономерной РС и температуры осадительной ванны (воды)

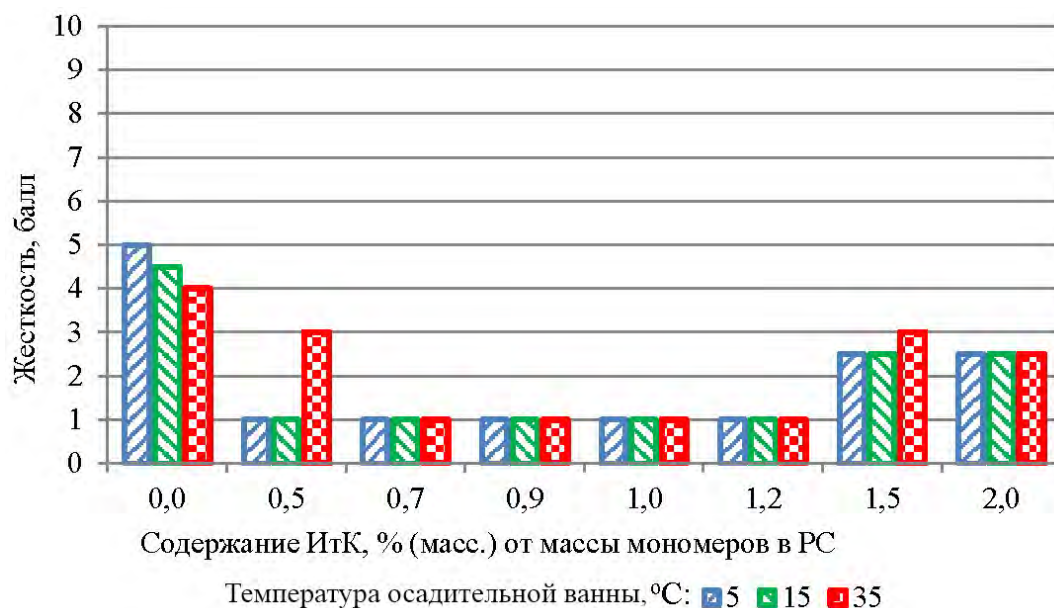


Рисунок 10 – Влияние на жесткость окрашенных волокон на основе поли[АН-со-МА-со-ИтК] содержания **ИтК** в мономерной РС и температуры осадительной ванны (55 % водный раствор ДМФ)

Показано, что фактическое содержание ИтК в поли[АН-со-МА-со-ИтК] меньше, чем в мономерной реакционной смеси, что может быть объяснено меньшей относительной реак-

ционной способностью этого мономера в реакциях свободно-радикальной сополимеризации с АН и МА.

Исследование окрашиваемости полиакрилонитрильных волокон в гель-состоянии показало, что количество сорбированного красителя и индекс белизны практически прямо пропорциональны содержанию кислотного сомономеров в поли[**АН-со-МА-со-ИмК**] и достоверно не зависят от температуры осадительной ванны. Максимальное снижение индекса белизны наблюдается при повышении содержания **ИмК** от 0 до 0,7 %. При дальнейшем увеличении содержания **ИмК** в сополимере наблюдается незначительное снижение индекса белизны с 11–14 до 7,4–7,8 %.

В ходе выполнения работы получена новая научная информация, необходимая для прогнозирования структуры полиакрилонитрильных

волоконистых материалов, формируемых по диметилформамидному методу, в случае варьирования содержания **ИмК** в поли[**АН-со-МА-со-ИмК**] и условий нитеобразования (состава и температуры осадительной ванны). Анализ полученных результатов позволяет сделать предварительные выводы о том, что оптимальная дозировка **ИмК** при синтезе сополимеров **АН**, **МА** и **ИмК** с точки зрения достижения максимальной степени окрашивания и минимальной жесткости получаемых волокон должна находиться в диапазоне от 0,7 до 1,2 % (от массы мономеров в реакционной смеси).

Работа выполнена при содействии завода «Полимир» ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк, Республика Беларусь).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chen, J., Wang, C., Ge, H., Bai, Y., Wang, Y. (2007), Effect of coagulation temperature on the properties of poly(acrylonitrile- itaconic acid) fibers in wet spinning, *J Polym Res*, 2007, V. 14, pp. 223–228.
2. Tan, L., Chen, H., Pan, D., Pan, N. (2008), Investigating the Spinnability in the Dry-Jet Wet Spinning of PAN Precursor Fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, Vol. 110, pp. 1997–2000.
3. Yi, K., Li, Q.-F., Zhang, L., Li, N., Zhou, Y., Ryu, S., Jin, R.G. (2013), Diffusion Coefficients of Dimethyl Sulphoxide (DMSO) and H₂O in PAN Wet Spinning and Its Influence on Morphology of Nascent Polyacrylonitrile (PAN) Fiber, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2013, V. 8, pp. 107–113.
4. Kulichikhin, V. G., Skvortsov, I. Yu., Mironova, M. I., Ozerin, A. N., Kurkin, T. S., Berkovich, A. K., Frenkin, E. I., Malkin, A. Ya. (2018), From Polyacrylonitrile, its Solutions, and Filaments to Carbon Fibers II. Spinning PAN-Precursors and their Thermal Treatment, *Advances in Polymer Technology*, Vol.

REFERENCES

1. Chen, J., Wang, C., Ge, H., Bai, Y., Wang, Y. (2007), Effect of coagulation temperature on the properties of poly(acrylonitrile- itaconic acid) fibers in wet spinning, *J Polym Res*, 2007, V. 14, pp. 223–228.
2. Tan, L., Chen, H., Pan, D., Pan, N. (2008), Investigating the Spinnability in the Dry-Jet Wet Spinning of PAN Precursor Fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, Vol. 110, pp. 1997–2000.
3. Yi, K., Li, Q.-F., Zhang, L., Li, N., Zhou, Y., Ryu, S., Jin, R. G. (2013), Diffusion Coefficients of Dimethyl Sulphoxide (DMSO) and H₂O in PAN Wet Spinning and Its Influence on Morphology of Nascent Polyacrylonitrile (PAN) Fiber, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2013, V. 8, pp. 107–113.
4. Kulichikhin, V. G., Skvortsov, I. Yu., Mironova, M. I., Ozerin, A. N., Kurkin, T. S., Berkovich, A. K., Frenkin, E. I., Malkin, A. Ya. (2018), From Polyacrylonitrile, its Solutions, and Filaments to Carbon Fibers II. Spinning PAN-Precursors and their Thermal Treatment, *Advances in Polymer Technology*, Vol.

37, No. 4, 2018, pp. 1076–1084.

5. Morris, E. A., Weisenberger, M. C., Rice, G. W. (2015), Properties of PAN Fibers Solution Spun into a Chilled Coagulation Bath at High Solvent Compositions, *Fibers*, 2015, V. 3, № 4, pp. 560–574.

6. Щербина, Л. А. (2002), *Разработка и внедрение синтеза волокнообразующего терсополимера акрилонитрила в гидротропном растворителе*, дис. .канд. тех. наук: 05.17.06, Минск, 2002, 161 с.

37, No. 4, 2018, pp. 1076–1084.

5. Morris, E. A., Weisenberger, M. C., Rice, G. W. (2015), Properties of PAN Fibers Solution Spun into a Chilled Coagulation Bath at High Solvent Compositions, *Fibers*, 2015, V. 3, № 4, pp. 560–574.

6. Shcherbina, L. A. (2002), *Development and implementation of the synthesis of fiber-forming acrylonitrile tersopolymer in hydrotropic solvent* [Razrabotka i vnedreniye sinteza voloknoobrazuyushchego tersopolimera akrilonitrila v gidrotropnom rastvoritele], dis. ...kand. tekh. nauk: 05.17.06, Minsk, 2002, 161 p.

Статья поступила в редакцию 12. 10. 2020 г.