

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-23-33

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Е.В. Степанова¹, Ю.А. Ивахненко¹, В.Г. Максимов¹, А.В. Истомин¹

Аннотация. Представлены результаты исследований нескольких марок частично гидролизованного поливинилового спирта. Исследованы реологические характеристики (зависимость вязкости от температуры и энергия активации вязкого течения) водных растворов полимера. Методом оптической микроскопии определена полнота растворения поливинилового спирта. Выявлены характерные для каждого способа растворения и типа полимера виды присутствующих в растворе инородных частиц. Установлено, что для получения технологически оптимальных растворов необходимо использовать поливиниловый спирт с относительно низкой молекулярной массой.

Ключевые слова: поливиниловый спирт, низкомолекулярный полимер, высокомолекулярный полимер, реологические характеристики, вязкость, энергия активации

Для цитирования: Степанова Е.В., Ивахненко Ю.А., Максимов В.Г., Истомин А.В. Исследование технологически значимых физических свойств различных марок поливинилового спирта // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-23-33.

Scientific article

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICALLY SIGNIFICANT PHYSICAL PROPERTIES OF VARIOUS BRANDS OF POLYVINYL ALCOHOL

E.V. Stepanova¹, Yu.A. Ivakhnenko¹, V.G. Maximov¹, A.V. Istomin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the results of research on several brands of partially hydrolyzed polyvinyl alcohol. Rheological characteristics (dependence of viscosity on temperature and activation energy of flow) of aqueous polymer solutions are determined. The completeness of the dissolution of polyvinyl alcohol was determined by optical microscopy. The types of foreign particles present in the solution characteristic of each method of dissolution and type of polymer have been identified. It has been established that the use of polyvinyl alcohol with a relatively low molecular weight is required to obtain technologically optimal solutions.

Keywords: polyvinyl alcohol, low molecular weight polymer, high molecular weight polymer, rheological characteristics, viscosity, activation energy

For citation: Stepanova E.V., Ivakhnenko Yu.A., Maximov V.G., Istomin A.V. Investigation of technologically significant physical properties of various brands of polyvinyl alcohol. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-23-33.

Введение

Развитие многих отраслей промышленности (нефтехимической, медицинской, металлургической, текстильной и др.) сложно представить без применения волокнистых материалов [1–9]. Из всего многообразия разработанных волокон следует выделить волокна технического назначения, применяемые для получения углеродных и шовных материалов, а также волокнистых изделий с заданным временем деградации, устойчивых к воздействию разбавленных кислот, оснований и органических растворителей. Одним из видов сырья для получения волокна технического назначения является поливиниловый спирт (ПВС), что обусловлено особенностями строения его макромолекулярной цепи.

В последнее время в различных отраслях промышленности широко применяют полимерные композиционные материалы, армированные углеродными волокнами [10, 11]. Углеродные материалы, полученные из поливинилспиртовых прекурсоров, могут выступать в качестве альтернативного наполнителя наравне с традиционным углеродным волокном.

По химической природе ПВС относится к классу линейных, насыщенных, карбоцепных полимеров и обладает рядом уникальных свойств, таких как высокая растворимость в воде, устойчивость к ультрафиолету и микроорганизмам, инертность к действию органических растворителей, разбавленных кислот и щелочей, биосовместимость, поэтому находит применение во многих отраслях промышленности. В частности, в химической промышленности полимер используют для получения волокон, пленок, клеев, лакокрасочных материалов, а также в полимераналогичных превращениях для создания новых высокомолекулярных соединений; в металлургии – как закалочную среду при производстве высокопрочных сталей; в приборостроительной сфере – для производства циклографических клише и различных печатных плат; в фармацевтике – для создания оболочек таблеток и капсул, а также в составе лекарственных сиропов и антисептических препаратов [12–14]; в хирургии – как растворимый шовный материал; в смеси с карбоксиметилцеллюлозой – для загущения и эмульгирования соусов и кремов [15].

Для удовлетворения всех производственных потребностей разработана линейка полимеров, обладающих различными свойствами (табл. 1) [16].

Таблица 1

Марки и области применения поливинилового спирта

Марка полимера	Область применения
6/1, 8/1, 11/2	Компонент светочувствительных копировальных растворов для изготовления цинкографских клише, отсчетных печатных форм и печатных плат
11/2	Компонент светочувствительных растворов для изготовления многослойных печатных плат методами попарного прессования и сквозной металлизации отверстий, для двусторонних печатных плат комбинированным позитивным методом
18/11	Пропиточный материал при изготовлении маслостойкой прочной полупрозрачной бумаги, в качестве стабилизатора при суспензионной полимеризации стирола и при изготовлении сополимерной дисперсии на основе винилацетата
6/1, 8/1, 16/1, 20/1	Связующий материал при изготовлении тонких формовочных порошков для керамики и стержневых смесей для литья
16/1, 18/11, 20/1	Для шлихтования волокон и пряжи из натуральных, искусственных, синтетических волокон, в качестве эмульгатора для приготовления эмульсий при перекисном отбеливании хлопчатобумажных швейных ниток
6/1, 8/1, 11/2, 16/1, 20/1, 40/2	Для синтеза поливинилацеталей в качестве эмульгатора и стабилизатора при эмульсионной полимеризации винилацетата и других мономеров
6/1, 8/1, 11/2, 16/1, 5/9	В производстве клеев, в чистом виде и в смеси с наполнителем для склеивания кожи, ткани, бумаги, для наклеивания этикеток
40/2 высший сорт	При изготовлении поляроидов
16/1, 20/1	Добавка для меловой суспензии

Особый интерес в области переработки и применения ПВС представляет получение волокна. В зависимости от условий обработки свежесформованное поливинилспиртовое волокно приобретает различные потребительские свойства: высокую прочность, устойчивость к истиранию, изгибу, химическому воздействию, низкую электропроводность, выступает в качестве прекурсора углеродных волокон [17]. В настоящее время налажен выпуск ровинга и штапельного волокна следующих марок: Винол (Россия), Тевирон, Куралон (Япония), Виналон (Китай), Саран, Виньон (США), Ровиль (Франция) [18]. Химические волокна производят в соответствии с общей технологией переработки полимерных материалов. Однако процесс имеет ряд специфических особенностей, обусловленных малым диаметром волокна, а также анизотропией структуры и свойств. Основной технологической задачей при получении ориентированных полимерных материалов является корреляция между структурой полимера, процессом формования и комплексом свойств полученного волокна.

В процессе волокнообразования раствор или расплав полимера испытывает значительные механические нагрузки, влияющие на структуру и реологические свойства жидкости, что в свою очередь отражается на характеристиках получаемого волокна. Для понимания процесса волокнообразования целесообразно изучить водные растворы полимера, так как в большинстве случаев формирование волокна осуществляется из раствора ПВС в воде [19].

Процесс волокнообразования напрямую связан с внутри- и межмолекулярным взаимодействием в полимерных жидкостях. Жидкое состояние характеризуется относительной свободой вращения между участками полимерной цепи. Подвижность элементов макромолекулы и энергетические барьеры обуславливают наличие большого количества пространственных конформаций полимера. Обладая значительной протяженностью, макромолекулы, в частности ПВС, могут находиться в составе различных конформационных образований, формируя структурированную систему с большим набором меж- и внутримолекулярных связей различной силы. Полимеры в жидком состоянии образуют пространственные системы различной степени стабильности, находящиеся в термодинамическом равновесии в зависимости от условий внешней среды. Наличие и интенсивность меж- и внутримолекулярных связей в полимерной жидкости определяют ее реологические свойства [20].

В основе теории течения высокомолекулярных жидкостей лежит явление диффузионного перемещения молекул. Течение происходит за счет сдвигового смещения как макромолекул в целом, так и их частей. Движение происходит не одновременно, а состоит из отдельных актов смещения сегментов макромолекулярной цепи. Для полимеров с большой молекулярной массой и высокой степенью структурированности смещение макроцепи в целом происходит в результате многочисленных элементарных актов, что выражается в высокой вязкости полимерной жидкости [21].

Реологические характеристики растворов с высокой концентрацией полимеров и разбавленных радикально различаются. Характер течения растворов с низким содержанием высокомолекулярной составляющей обусловлен не только длиной и гибкостью макроцепи, но и сольватацией отдельных макромолекул. В концентрированных растворах и расплавах характер течения определяется в основном межмолекулярным взаимодействием [22]. Исходя из основных условий течения, можно утверждать, что раствор ПВС с большим количеством остаточных ацетатных групп будет иметь более низкую вязкость и более линейный характер кривой течения за счет меньшего количества меж- и внутримолекулярных связей, обусловленных влиянием стерического фактора заместителя.

В технологическом процессе волокнообразования зачастую используют концентрированные растворы полимеров, макромолекулы которых в состоянии покоя образуют флуктуационную сетку зацепления. В статическом состоянии такие полимерные растворы обладают значительной вязкостью. С увеличением внешней сдвиговой нагрузки структурные элементы раствора и макромолекулы начинают ориентироваться в направлении вектора приложения силы. Упорядоченное внутреннее строение жидкости способствует более легкому передвижению макроцепей и структурных образований относительно друг друга, что проявляется в снижении вязкости системы. С технологической точки зрения, такой эффект можно использовать для повышения производительности оборудования при условии повышения нагрузки на перерабатываемую жидкость [23].

Следует отметить, что степень уменьшения вязкости при нарастании скорости сдвига для псевдопластичных жидкостей не проявляет линейный характер. При малых нагрузках полимерный раствор может вести себя подобно ньютоновской жидкости с определенной вязкостью. В случае, когда энергия, подводимая сдвиговой нагрузкой, превосходит дезориентирующее влияние броуновского движения, вязкость полимерного раствора резко уменьшается. Дальнейшее увеличение энергии сдвига не приводит к снижению вязкости, так как достигнуты оптимальные условия ориентации полимерной системы.

Материалы и методы

Исследование 10%-ных водных растворов ПВС проводили на ротационном реометре при температуре 20 °С с использованием измерительной системы «конус–плоскость» с углом конуса 1 градус, внешним радиусом конуса 50 мм, зазором между усеченной частью конуса и плоскостью 52 мкм в диапазонах скоростей сдвига 0,01–700 с⁻¹ и напряжений сдвига 0,0566–1460 Па.

Исследование с использованием оптического микроскопа проводили в поляризованном свете с компенсатором. Растворы заливали в кюветы, образованные покровным и предметным стеклами, которые разделяли дистанцирующей шайбой. Наблюдение вели со стороны покровного стекла. Использование поляризованного света позволяет видеть оптическую анизотропию некоторых структурных составляющих препаратов и выявлять закристаллизованные и жидкокристаллические участки.

В качестве объекта исследования выбран частично гидролизованный низко- и высокомолекулярный ПВС со степенью полимеризации 5000. Степень гидролиза составила ~88 %.

Поливинилспиртовые волокна получали из водных формовочных растворов, поэтому изучали взаимодействие полимера с низкомолекулярным соединением (водой). На процесс растворения ПВС влияют внешние факторы: температура, давление, продолжительность взаимодействия. Для получения растворов ПВС использовали «кипящую» водяную баню при температуре 87 °С в течение 6 ч с предварительным набуханием полимера; автоклавирование при температуре 90 °С в течение 6 ч; микроволновое излучение мощностью 800 Вт (продолжительность облучения выбирается исходя из необходимости доведения раствора до кипения).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.


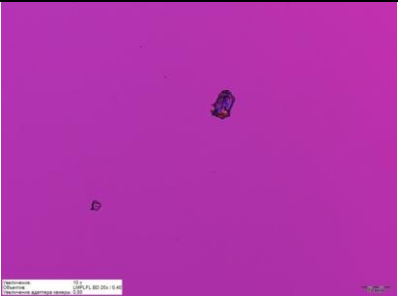
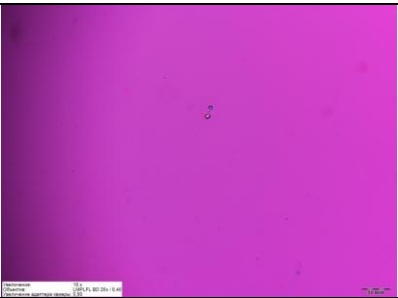
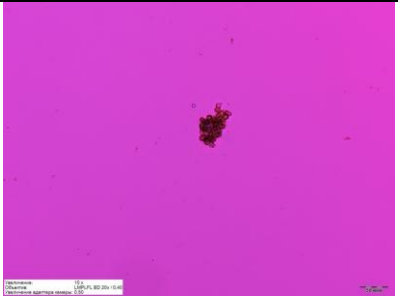
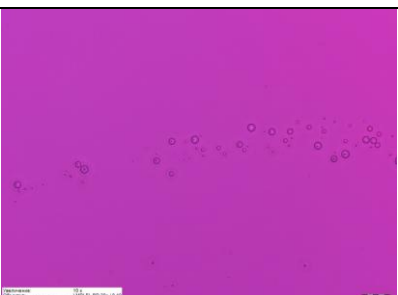
Результаты и обсуждение

Исследование методом оптической микроскопии

Типы включений (инородных частиц), выявленных в растворах ПВС, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Типы включений, обнаруженных в растворе поливинилового спирта методом оптической микроскопии

Тип включений	Характеристика включений	Внешний вид включений
1	Практически неразваренные частицы исходного полимера, имеющие слабые и плавно переходящие друг в друга зоны интерференционной окраски. Слабо набухшие частицы возможно имеют вторичное (экзогенное) происхождение и попали в раствор при приготовлении препарата	
2	Набухшие частицы, имеющие заметный локальный рельеф, и достаточно резко отделенные друг от друга зоны анизотропии, вызванные кристаллизацией. По мнению авторов данной статьи, являются частицами типа 1, претерпевшими существенное воздействие воды, что упростило их кристаллизацию, т. е. имеют эндогенное происхождение	
3	Округлившися полужидкие частицы с хорошо выраженной внутренней оптической анизотропией, т. е. жидкокристаллические. Являются результатом глубокого набухания, предваряющим переход в истинный раствор. Встречаются достаточно редко и типичны для непродолжительной промежуточной стадии растворения	
4	Округлые хорошо отграниченные от раствора, сильно преломляющие гранулы со слабой анизотропией, почти всегда объединенные в группы. Встречаются исключительно в растворах, прошедших автоклавную обработку. По мнению авторов данной статьи, появляются в результате преждевременной сшивки высококонцентрированных участков полимерного геля	
5	Круглые жидкие устойчивые к растворению капли раствора высокой концентрации. Являются результатом распада полученного раствора. Количество капель быстро увеличивается в растворах высокомолекулярных полимеров независимо от способа растворения	

Микроскопическое исследование показало, что наименьшее количество включений при полном отсутствии включений типа 4 имеют растворы, приготовленные с использованием предварительного набухания.

Нежелательная при последующих операциях склонность к расслаиванию полимерного раствора (образованию включений типа 5), свойственная полимерам изученной серии, явно и резко усиливается при увеличении молекулярной массы растворяемого полимера.

Использование автоклавной обработки делает процесс растворения весьма чувствительным к параметрам (времени и температуре) предварительного набухания.

Реологические исследования

Для оптимизации процесса получения поливинилспиртового волокна и прогнозирования характера течения формовочного раствора следует изучить характер течения водных растворов ПВС, полученных с применением различных схем растворения.

Одной из основных характеристик растворов высокомолекулярных соединений является зависимость вязкости системы от скорости (напряжения) сдвига.

На рис. 1 приведены зависимости вязкости [24] от скорости сдвига растворов, полученных с использованием «кипящей» бани, автоклавирования и микроволнового облучения.

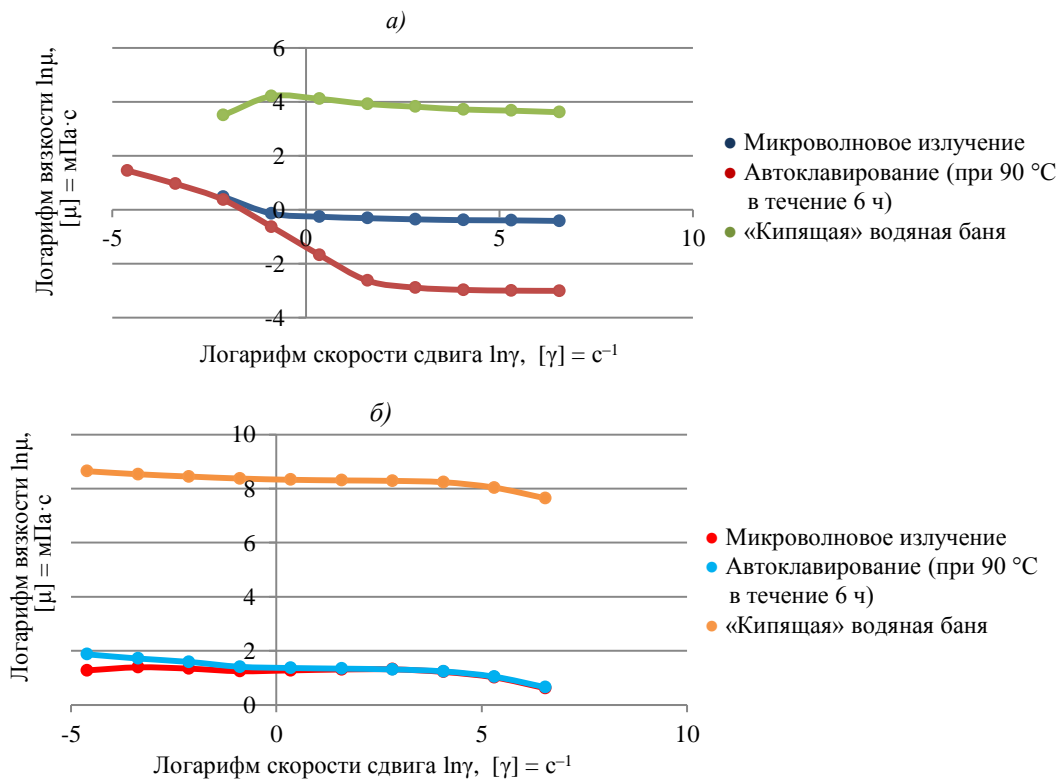


Рис. 1. Зависимости вязкости низко- (а) и высокомолекулярного (б) растворов поливинилового спирта от скорости сдвига

Анализ диаграмм показал, что наибольшее значение вязкости наблюдается у низко- и высокомолекулярных растворов ПВС, полученных с использованием «кипящей» водяной бани. Это свидетельствует о более устойчивой к сдвигу структуре растворов, полученных данным способом. Следует отметить, что при использовании низкомолекулярного полимера на свойства растворов накладывается эффект от обратимой механической деструкции ассоциатов либо от распрямления конформации молекул полимера от клубков к стержням.

Как видно из рис. 2, в приведенном диапазоне напряжение сдвига прямо пропорционально скорости сдвига, что свидетельствует о ньютоновском режиме течения вышеуказанных растворов ПВС.

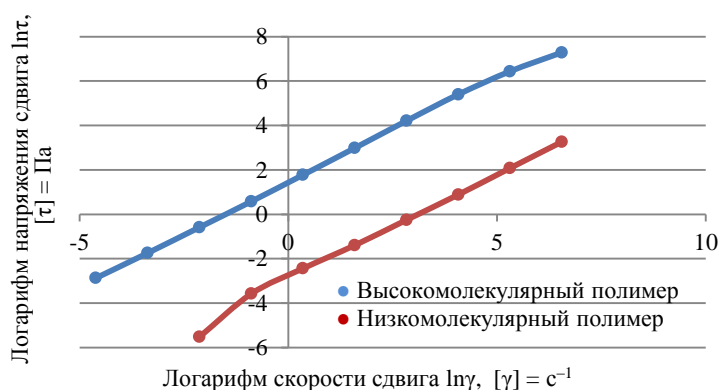


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига растворов поливинилового спирта

Получены зависимости вязкости растворов ПВС от температуры, на основании которых определена энергия активации вязкого течения (табл. 3, рис. 3) [25]. Данный показатель рассчитан по уравнению Аррениуса как тангенс угла наклона прямой в координатах $\ln\mu = f(1/RT)$:

$$\mu = \mu_0 \exp^{-E_a/RT},$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с; μ_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации вязкого течения, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К.

Таблица 3

Вязкость растворов высоко- и низкомолекулярных полимеров при различных температурах

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Температура T , °С	$1/RT$, моль/Дж	Вязкость, мПа·с	Логарифм вязкости $\ln\mu$	Энергия активации вязкого течения E_a , кДж/моль
Высокомолекулярный полимер					
0,01	10	0,43	2610	5,56	57,91
	15	0,42	3330	5,81	
	20	0,41	1630	5,09	
	25	0,40	827	4,42	
700	10	0,43	1610	5,08	39,26
	15	0,42	1420	4,96	
	20	0,41	841	4,43	
	25	0,40	754	4,32	
Низкомолекулярный полимер					
0,01	10	0,43	401	5,99	42,28
	15	0,42	312	5,74	
	20	0,41	324	5,78	
	25	0,40	144	4,97	
700	10	0,43	46,3	3,84	23,44
	15	0,42	36,3	3,60	
	20	0,41	31,3	3,44	
	25	0,40	27,9	3,33	

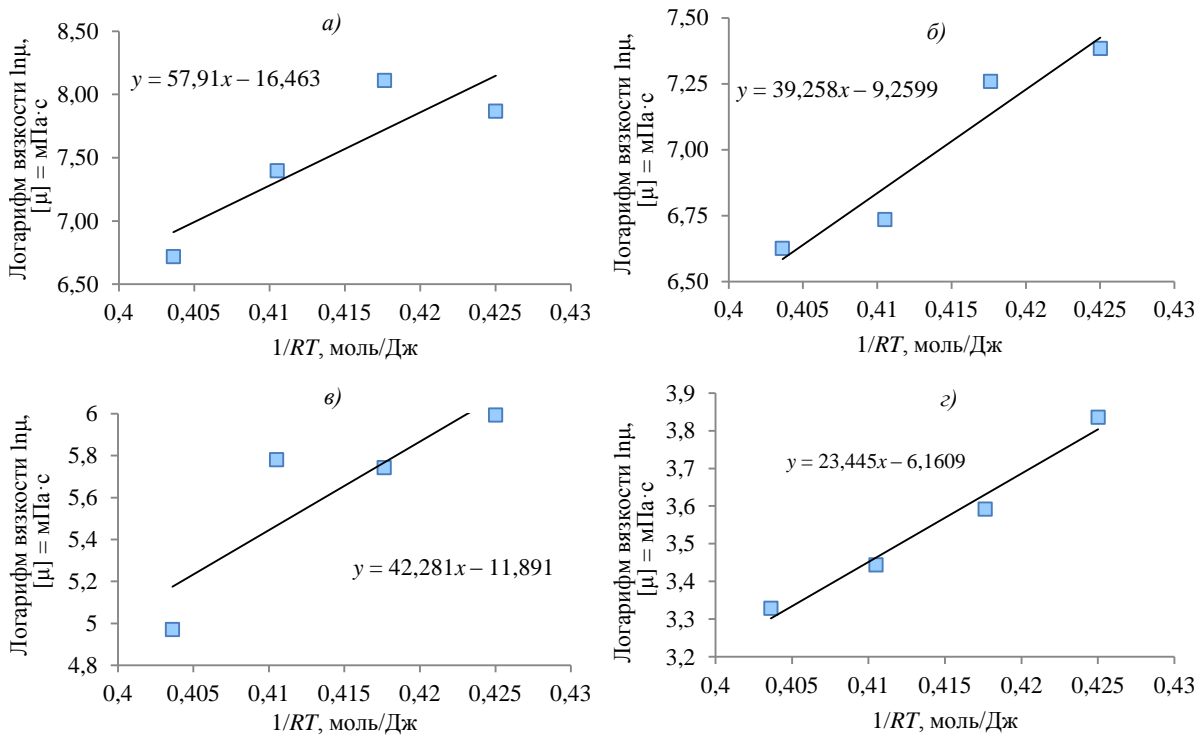


Рис. 3. Зависимости вязкости растворов высоко- (а, б) и низкомолекулярного (в, з) поливинилового спирта от температуры при скорости сдвига $0,01$ (а, в) и 700 c^{-1} (б, з)

Энергия активации вязкого течения и динамическая вязкость в диапазоне скоростей сдвига $0,01\text{--}700 \text{ c}^{-1}$ уменьшается при увеличении скорости сдвига, что будет учитываться при анализе течения растворов.

Заключения

Рассмотрена линейка частично гидролизированных ПВС. Исследовано влияние температуры и времени растворения на реологические характеристики водных растворов ПВС. Определена энергия активации вязкого течения полученных растворов. Методом оптической микроскопии исследованы растворы полимеров, приготовленные различными способами.

Учитывая, что энергия активации вязкого течения характеризует упругие свойства растворов полимеров, то уменьшение уровня этого показателя свидетельствует об улучшении волокнообразующих свойств. Хотя данное свойство растворов ПВС имеет противоположную вязкости зависимость от молекулярной массы.

Анализ количества и характера включений, обнаруженных при оптическом исследовании, показал, что оптимальными по параметрам физической устойчивости раствора и технологичности растворения следует признать полимеры с невысокой динамической вязкостью. Оптимальная технология приготовления их растворов включает процессы, использующие предварительное глубокое набухание и умеренно высокие температуры растворения (количество сварившихся до малорастворимого состояния частиц геля при автоклавной обработке увеличивалось при повышении температуры процесса).

По предварительной оценке, основанной на исследовании физических свойств и микроструктуры растворов ПВС, оптимальными для получения волокнообразующих растворов следует признать полимеры с пониженной молекулярной массой. Данный вывод следует из исследования как энергии вязкого течения, так и физической

устойчивости растворов, оцененных по наличию либо отсутствию характерных для расслаивания раствора жидких включений.

Опробование модифицированных технологий растворения не показало их преимуществ перед традиционными способами.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Ивахненко Ю.А., Кузьмин В.В., Беспалов А.С. Состояние и перспективы развития теплозвукоизоляционных пожаробезопасных материалов // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 7. С. 27–30.
5. Бучилин Н.В., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Керамические фильтры для расплава алюминия (обзор) // Стекло и керамика. 2015. № 7. С. 20–28.
6. Максимов В.Г., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Особенности получения керамических материалов из активных к спеканию порошков // Новые огнеупоры. 2023. № 10. С. 14–21.
7. Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Воронов В.А., Солнцев С.С. Керамические материалы на основе оксидов алюминия и циркония, полученные золь-гель методом // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
8. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С., Куваев М.Д., Куликов С.А., Максимова Н.В., Пикулин И.В., Потемкин Г.А., Редюшев С.А., Самсонов Г.Ю., Скорочкин Ю.В. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
9. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
10. Душин М.И., Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Караваев Р.Ю. Исследование процесса безавтоклавного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (94). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-21-31.
11. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
12. Розенберг М.Э. Полимеры на основе поливинилацетата. Ленинград: Химия, 1983. 176 с.
13. Ушаков С.Н. Поливиниловый спирт и его производные: в 2 т. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 1. 552 с.
14. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М.: Химия, 1974. 376 с.
15. Жиликова Е.Т., Попов Н.Н., Халикова М.А., Новикова М.Ю., Придачина Д.В. Технологические характеристики супрамикроструктурированного комбинированного пролонгатора-загустителя Na-КМЦ и ПВХ // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 4–2. С. 450–452.
16. ГОСТ 10779–78. Спирт поливиниловый. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). М.: Изд-во стандартов, 1978. 23 с.

17. Харченко И.М. Термохимические превращения поливинилспиртового волокна в присутствии пиролитических добавок при получении углеродного волокна: автореф. дис. ... кан. хим. наук. М., 2006. 174 с.
18. Бузов Б.А., Алыменкова Н.Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности. М.: АСАДЕМА, 2004. 135 с.
19. Лебедева А.В., Олехнович Р.О., Морозкина С.Н., Успенская М.В. Исследование получения нановолокон из водных растворов поливинилового спирта методом электроспиннинга // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 210–220. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-210-220.
20. Перепелкин К.Е. Физико-химические основы процессов формования химических волокон. М.: Химия, 1978. 320 с.
21. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. 4-е изд.. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
22. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / пер. с англ. И.А. Лавыгина; под ред. В.Г. Куличихина. М.: КолосС, 2003. 312 с.
23. Пакшвер Э.А., Перепелкин К.Е., Фихман В.Д., Варшавский В.Я., Зверев М.П. Карбоцепные синтетические волокна. М.: Химия, 1973. 589 с.
24. Крупненникова В.Е., Раднаева В.Д., Танганов Б.Б. Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+Pro. Улан-Удэ: ВСГТУ, 2011. 47 с.
25. Бартенев Г.М. Определение энергии активации вязкого течения полимеров по экспериментальным данным // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6. № 2. С. 335–340. DOI: 10.1016/0032-3950(64)90322-3.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Ivakhnenko Yu.A., Kuzmin V.V., Bepalov A.S. State and prospects for the development of heat and sound insulating fireproof materials. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2014, no. 7, pp. 27–30.
5. Buchilin N.V., Maksimov V.G., Babashov V.G. Ceramic filters for molten aluminum (review). *Steklo i keramika*, 2015, no. 7, pp. 20–28.
6. Maksimov V.G., Varrik N.M., Babashov V.G. Features of obtaining ceramic materials from sintering-active powders. *Novye ognepory*, 2023, no. 10, pp. 14–21.
7. Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Voronov V.A., Solntcev S.S. Al₂O₃ and ZrO₂ ceramic materials obtained by sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
8. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
9. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
10. Dushin M.I., Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Karavaev R.Yu. Research of process of out-of-autoclave formation semipregs on the basis of carbon fillers (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-21-31.

11. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
12. Rosenberg M.E. *Polyvinyl acetate based polymers*. Leningrad: Khimiya, 1983, 176 p.
13. Ushakov S.N. *Polyvinyl alcohol and its derivatives*: in 2 vols. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1960, vol. 1, 552 p.
14. Konkin A.A. *Carbon and other heat-resistant fibrous materials*. Moscow: Khimiya, 1974, 376 p.
15. Zhilyakova E.T., Popov N.N., Khalikova M.A., Novikova M.Yu., Pridachina D.V. Technological characteristics of a supramicrostructured combined prolongator-thickener Na-CMC and PVA. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya*, 2015, no. 4–2, pp. 450–452.
16. State Standatd 10779–78. *Polyvinyl alcohol. Technical specifications (with Amendments No. 1, 2)*. Moscow: Publ. house of standards, 1978, 23 p.
17. Kharchenko I.M. Thermochemical transformations of polyvinyl alcohol fiber in the presence of pyrolytic additives during the production of carbon fiber: abstract thesis, Cand. Sc. (Chem.). Moscow, 2006, 174 p.
18. Buzov B.A., Alymenkova N.D. Materials science in the production of light industry products. Moscow: ACADEMA, 2004, 135 p.
19. Lebedeva A.V., Olekhovich R.O., Morozkina S.N., Uspenskaya M.V. Study of obtaining nano-fibers from aqueous solutions of polyvinyl alcohol by electrospinning. *Vestnik VGUIT*, 2022, vol. 84, no. 2, pp. 210–220. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-210-220.
20. Perepelkin K.E. Physico-chemical foundations of the processes of forming chemical fibers. Moscow: Khimiya, 1978, 320 p.
21. Tager A.A. *Physico-chemistry of polymers*. 4th ed. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 576 p.
22. Schramm G. Fundamentals of practical rheology and rheometry. Trans. from Engl. I.A. Lavygina; ed. V.G. Kulichikhin. Moscow: KolosS, 2003, 312 p.
23. Pakshver E.A., Perepelkin K.E., Fikhman V.D., Varshavsky V.Ya., Zverev M.P. *Carbon-chain synthetic fibers*. Moscow: Khimiya, 1973, 589 p.
24. Kruppennikova V.E., Radnaeva V.D., Tanganov B.B. *Determination of dynamic viscosity using a Brookfield RVDV-II+Pro rotational viscometer*. Ulan-Ude: VSTU, 2011, 47 p.
25. Bartenev G.M. Determination of the activation energy of viscous flow of polymers from experimental data. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya*, 1964, vol. 6, no. 2, pp. 335–340. DOI: 10.1016/0032-3950(64)90322-3.

Информация об авторах

Степанова Елена Васильевна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ивахненко Юрий Александрович, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Максимов Вячеслав Геннадьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Истомин Александр Васильевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Elena V. Stepanova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yuriy A. Ivakhnenko, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav G. Maksimov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Istomin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.01.2024.
The article was submitted 24.01.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.01.2024.