

На правах рукописи



**ТИХОНОВ Вячеслав Борисович**

**УСТРОЙСТВА И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АНИЗО-  
ТРОПНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул – 2011

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» и ООО «Бийский завод стеклопластиков»

**Научный руководитель**

кандидат технических наук, доцент  
Блазнов Алексей Николаевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Плотников Владимир Александрович

кандидат технических наук  
Петров Марк Григорьевич

**Ведущая организация**

Институт физики прочности и материаловедения  
СО РАН, г. Томск

Защита состоится «18» марта 2011 года в 15.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.005.03 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет» по адресу: 656049, г. Барнаул, пр-т Ленина, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

Автореферат разослан «16» февраля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Рудер Д.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Длительная прочность и долговечность - это важнейшие характеристики, используемые при проектировании и реализующиеся при эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Старение полимеров и разрушение стеклопластиковых изделий на различных объектах применения могут вести к значительным убыткам, например выход из строя линии электропередачи вследствие разрушения стеклопластикового сердечника электроизолятора, и к человеческим жертвам при обрушении фрагментов стен в зданиях или шахтных сводах, в случае обрыва анкерных стеклопластиковых связей.

Стеклопластиковые стержни в зависимости от условий применения могут подвергаться всем видам нагружения: растяжению, сжатию и изгибу. Обычно, для нового малоизученного материала, прогнозирование долговечности производят на основе экспериментальных исследований для каждого вида нагружения, приближенного к условиям эксплуатации. Вследствие этого, для количественной оценки долговечности материала, необходима разработка экспериментальных устройств и методов длительных статических испытаний ПКМ.

**Цель работы** — разработка, создание и апробация экспериментального устройства и метода длительных статических испытаний прочности стеклопластиковых стержней при сжатии, растяжении и продольном изгибе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать и создать устройство, предназначенное для проведения испытаний образцов на долговечность, позволяющее расширить функциональные возможности, повысить точность, снизить энергоемкость и габаритные размеры;
- разработать метод определения долговечности стеклопластиковых стержней, основанный на измерении времени до разрушения нагруженных образцов и последующей статистической обработке результатов с целью построения силовых зависимостей долговечности;
- провести апробацию разработанных устройств и метода на испытаниях гладких стержней, стержней периодического профиля и образцов-пластин, из различных ПКМ, с целью установления зависимости прочности образцов от основных факторов, таких как: размеры и форма образцов, условия соединения их с нагружающим устройством, схема приложения нагрузки, длительность воздействия нагрузки и т.д.

**Объекты исследования:**

- устройства для определения долговечности нагруженных стержней из ПКМ;
- метод определения силовых зависимостей долговечности стеклопластиковых стержней.

**Предметы исследования:**

- образцы для определения долговечности стержней из ПКМ при растяжении, сжатии и продольном изгибе;
- влияние формы и размеров образцов, условий соединения их с захватами; схемы приложения и длительности действия нагрузки на результат испытаний;
- применимость метода определения долговечности для различных условий: температуры испытаний, способов приложения нагрузки, вида ПКМ.

В работе применены **методы аналитических и экспериментальных исследований**. Аналитический метод применяется для математической обработки результа-

тов измерения прочности и долговечности образцов, для расчета эффективного диаметра стержней периодического профиля, оценки погрешностей методов испытаний и статистической обработки результатов. Экспериментальные исследования служат для изучения экспериментальных установок, исследования влияния размеров образцов и захватов на результат испытаний, апробации разработанных методов и устройств для испытаний стеклопластиков, получения эмпирических данных о прочности и долговечности ПКМ.

#### **Научная новизна:**

1. Разработано и создано экспериментальное устройство комплексных испытаний на растяжение, сжатие и продольный изгиб для измерений долговечности ПКМ, новизна которого состоит в том, что в одном из испытываемых образцов создается постоянная сжимающая нагрузка, а во втором равная по величине растягивающая нагрузка, посредством продольно изогнутых стержней, которые являются и нагружающим механизмом и испытываемыми образцами одновременно.

2. Разработан метод измерения долговечности, новизна которого состоит в общей совокупности и заданной последовательности проведения процедур, включающих: отбор представительной выборки образцов и деление ее на равные группы для испытаний на прочность и долговечность; испытание временной прочности и аппроксимация ее зависимости от вероятности разрушения, обоснование выбора величины постоянного напряжения и испытание на долговечность; аппроксимация распределений долговечности.

3. Разработан метод математической обработки экспериментальных результатов измерения долговечности, позволяющий построить эмпирические силовые зависимости приведенных значений напряжений от значений долговечности, соответствующих равной вероятности разрушения.

4. Получены эмпирические закономерности поведения стеклопластиковых стержней при сжатии в зависимости от отношения геометрических размеров.

#### **Практическая значимость:**

- созданы устройства и прикладные методики для испытаний однонаправленных стеклопластиковых стержней круглого сечения на растяжение, сжатие и продольный изгиб в промышленных условиях;

- разработанный метод длительных статических испытаний применен для построения силовых зависимостей долговечности;

- расширена область применения метода продольного изгиба для исследований механических свойств образцов-пластин, вырезанных из стекло- и углепластиковых плит и для стержней периодического профиля;

- выполнена модернизация конструкции установки для испытаний на продольный изгиб применением шарнирного крепления нагружающего наконечника, в устройстве передачи нагрузки от образца к силоизмерительному датчику, что повышает точность получаемых результатов;

- с помощью устройств и выявленных закономерностей при испытаниях на устойчивость при сжатии обоснованы диапазоны размеров образцов для измерений механических свойств изделий на сжатие и продольный изгиб;

- на основе решений совместно закона Гука и формулы Эйлера разработана и найдена применение на производстве методика по определению эффективного диаметра и модуля упругости стержней периодического профиля.

**Реализация результатов исследований.** Методы и оборудование для механических испытаний прочности и долговечности однонаправленных стеклопластиков, а также способы оригинальной обработки результатов внедрены в ООО «Бийский завод стеклопластиков» (ООО «БЗС»), г. Бийск. Методики испытаний введены в технические условия для контроля круглых однонаправленно армированных стеклопластиковых стержней постоянного и периодического сечения. Разработанный метод длительных статических испытаний используется в учебном процессе в Алтайском государственном техническом университете (АлтГТУ) им. И.И. Ползунова. Использование результатов исследований подтверждено актами внедрения.

**Достоверность результатов исследований** подтверждена использованием известных законов механики, согласованием расчетных и экспериментальных данных, использованием для выполнения экспериментальных измерений высокоточных современных измерительных приборов, проведением государственной поверки используемого оборудования, анализом погрешностей экспериментов по стандартным методикам, воспроизводимостью результатов, полученных в нескольких независимых лабораториях при апробации методов и устройств для испытаний ПКМ.

**На защиту выносятся:**

- экспериментальное устройство комплексных испытаний для определения долговечности при растяжении, сжатии и продольном изгибе;
- новый метод измерения долговечности ПКМ при приложении постоянной по величине нагрузки;
- метод математической обработки экспериментальных результатов с целью построения силовых зависимостей долговечности;
- методика измерения эффективного диаметра стержней периодического профиля;
- результаты экспериментальных измерений механических свойств плоских образцов из стеклопластиковых и углепластиковых плит и стеклопластиковых стержней периодического профиля.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных, всероссийских и международных конференциях: VII- X Всерос. науч.-практ. конф. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» (г. Бийск, 2007-2010); I-я Региональная, II-я Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Полимеры, композиционные материалы и наполнители для них», («Полимер-2007, 2008») (г. Бийск 2007, 2008); I-я и III-я Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (г. Бийск, 2008, 2010); Всерос. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (г. Бийск, 2009); пятая междунар. конф. «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология» («Композит-2010», г. Энгельс 2010); 11-я Междунар. Молодежная Конференция-Семинар по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM 2010» (г. Новосибирск 2010). Материалы были удостоены специального диплома VIII-ой Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи («НТТМ-2008», г. Москва), получен грант ООО «БЗС» 2010 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 4 статьи в центральных журналах, рекомендуемых ВАК и 1 патент на изобретение, остальные доклады в сборниках конференций.

**Личный вклад автора** состоит в разработке конструкций установок и методов исследований механических свойств; создании прикладных методик испытаний и обработки результатов, выполнении экспериментальных работ и сертификационных испытаний изделий.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 130 наименований, 6 приложений, изложена на 132 страницах текста, содержит 46 рисунков, 22 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит постановку цели и задач исследований, выбор предмета, объекта и методов исследований, описание научной новизны и практической значимости результатов работы, приведены реализация результатов исследований, положения, выносимые на защиту и кратко изложено содержание глав диссертации.

**Первая глава** посвящена литературному обзору существующих методов и устройств для длительных статических испытаний ПКМ, анализу их достоинств и недостатков. Рассмотрены требования, предъявляемые к стеклопластиковым стержням при эксплуатации.

Методы длительных испытаний ПКМ не стандартизованы. Наиболее близким аналогом является ГОСТ 10145-81, регламентирующий метод длительных испытаний металлов под действием постоянных растягивающих нагрузок при постоянной температуре до 1200 °С, и патент РФ № 2167404, МПК<sup>7</sup> G01N3/00 на способ определения длительной прочности. В результате испытаний устанавливается зависимость между напряжением и временем до разрушения при заданной постоянной температуре. По результатам испытаний серии образцов для трех уровней напряжений определяют среднее значение времени до разрушения. По этим графикам экстраполируют определяют предел длительной прочности материала, на срок службы, не превышающий максимальное среднее значение времени до разрушения более, чем на один-полтора порядка. Данный метод устанавливает температурно-временную зависимость прочности металла, и определяет жаропрочность при повышенной температуре. Для ПКМ отсутствует понятие жаропрочность, и верхняя граница температурного диапазона эксплуатации обусловлена переходом полимерной матрицы композита из стеклообразного состояния в высокоэластическое. Исследователи долговременной прочности ПКМ отмечают большие разбросы значений долговечности внутри одной выборки образцов, что препятствует использованию методики ГОСТ 10145-81 для длительных испытаний ПКМ и осреднения результатов.

В литературе описаны несколько устройств для длительных испытаний материалов на растяжение (пат. RU 2219520, МКИ G01N 3/08; RU 2141636, МКИ GO IN 3/08), которые содержат станину и установленный на ней механизм нагружения, выполненный в виде двух захватов для концов образца и рычага, связанного с одним из захватов, груза, закрепленного на конце рычага и двух конечных выключателей, связанных с рычагом и механизм компенсации удлинения образца. Обычно нагрузку в образце создают с помощью груза, при этом возникают сложности при нагружении

ях высокопрочных материалов, таких как однонаправленные стеклопластики. Также известны установки, нагружающий механизм которых выполнен на основе гидроцилиндра, что увеличивает габариты установок и усложняет процесс длительных испытаний.

Анализ описанных в литературе устройств длительных испытаний выявил общие недостатки – эти устройства сложны по конструкции, не учитывают специфику ПКМ при нагружении (используют те же захваты, что и для статических испытаний), производят нагружение с помощью гирь, рычагов и т.д., не позволяют изготовить компактные устройства для испытаний одновременно нескольких образцов, используют косвенные методы оценки уровня действующих напряжений и момента разрушения, применяют устаревшее измерительное оборудование типа динамометра, обладающее низкой точностью и не позволяющее вести запись в автоматическом режиме, с использованием ЭВМ.

Длительную прочность и долговечность ПКМ исследовали Журков С.Н., Бартечев Г.М., Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А., Ратнер С.Б., Ярцев В.П., Регель В.Р., Слуцкер А.И., Степанов В.А., Иванова И.Н., Петров В.А., Петров М. Г. Физические основы долговечности материалов отражает кинетическая концепция разрушения, основанная на систематических исследованиях сотрудников Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР в начале 1950-х годов. Для многих материалов (металлов, стекол, полимеров, горных пород и т.д.) Журковым С.Н., Бартечевым Г.М., Ратнером С.Б., Скудрой А.М., Булавсом Ф.Я. и другими исследователями предложены эмпирические выражения для обработки результатов и прогнозирования долговечности.

На практике применяются параметрические методы, в результате которых по ускоренным испытаниям длительностью несколько часов при разных температурах, применяя принцип температурно-временной суперпозиции, по известным выражениям экстраполируют результаты испытаний на 50 лет и более. Например, для распространенных в строительстве стеклопластиковых стержней при обработке одних и тех же эмпирических данных по различным теориям, длительная прочность составила 0,22 и 0,65 на срок эксплуатации 50 лет. Такое противоречие демонстрирует, что способ обработки экспериментальных данных существенно влияет на результат.

Стержневые изделия из ПКМ обладают высокой прочностью в осевом направлении, высокой электрической прочностью, высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом теплопроводности, низкой удельной массой, хладостойкостью. Благодаря сочетанию перечисленных свойств армированные ПКМ находят широкие возможности для применения их в различных отраслях техники. Стеклопластиковые стержни применяют как силовой элемент в оптоволоконных кабелях, гибкие связи в трехслойных панелях и стенах, для изготовления полимерных изоляторов, стеклопластиковых насосных штанг в нефтедобывающей промышленности, стеклопластиковых анкерных крепей в горном деле, в строительной отрасли успешно применяется стеклопластиковые стержни периодического профиля (СППС) благодаря близкому значению коэффициентов линейного расширения стеклопластика и бетона. Основными требованиями к свойствам стеклопластиковых изделий являются: высокая прочность в осевом направлении – до 1500 МПа, модуль упругости при растяжении/сжатии – 45-50 ГПа, долговечность до 100 лет при температуре экс-

платации от минус 70 до плюс 60 °С. Эти требования к свойствам изделий определяют необходимость развития соответствующих методов испытаний.

Исследователи отмечают большие разбросы долговечности при испытаниях ПКМ, в связи с этим возникают проблемы испытаний и обработки результатов. При длительных испытаниях ПКМ неизбежно возникнет ситуация, что часть образцов разрушится в реальном времени, отведенном на эксперимент, а часть не разрушится сколь угодно долго. Необходима разработка нового экспериментального метода длительных статических испытаний, который позволит прогнозировать прочность ПКМ на срок эксплуатации до 50-100 лет за время испытаний не более трех месяцев.

В результате анализа литературы выявлено отсутствие стандартных методов и устройств для определения долговечности анизотропных ПКМ при различных видах нагружения. В связи с этим, целью исследований стала разработка экспериментальных устройств и нового метода длительных статических испытаний ПКМ.

**Во второй главе** описано развитие устройств и методов статических испытаний при различных видах нагружения, поскольку для реализации метода по определению долговечности необходимо знать исходную прочность изделий.

Исходя из требований к свойствам стеклопластиковых изделий, в качестве основных методов испытаний были приняты растяжение, сжатие и изгиб, в ходе работы исследовали влияние схемы нагружения, формы образцов и применяемых устройств на результат измерения механических свойств стеклопластиков.

В работах по исследованию методов механических испытаний армированных пластиков Ю.М. Тарнопольский с сотрудниками оценили влияние захватов, формы и размеров образцов на прочность стеклопластиковых пластин и привели следующие значения прочности: при растяжении – от 500 до 800 МПа, при сжатии 200 - 400 МПа, для круглых стержней такие данные отсутствуют. Основной проблемой испытаний ПКМ является анизотропия свойств вдоль и поперек армирования, в результате чего разрушение происходит обычно в захвате, под действием сдвиговых деформаций связующего.

**Растяжение.** В работе были предложены новые конструкции захватов и проведено их исследование при применении для испытаний стеклопластиковых стержней круглого постоянного и периодического сечения. Для различных схем закрепления образца в захватах испытательной машины были получены значения прочности при растяжении от 520 до 1450 МПа. Разрушение образцов происходило по краю захвата, следовательно, истинный предел прочности не достигнут. В ходе дальнейшей работы для испытаний на растяжение стеклопластиковой арматуры (СПА) диаметром 5,5 и 7,5 мм с анкерными уширениями, а также для стержней периодического профиля номинальным диаметром 6 - 22 мм, были выбраны схемы, показавшие наилучший результат (таблица 1), которые введены в технические условия на ООО «Бийский завод стеклопластиков» для испытаний на растяжение СПА ТУ 2296-001-20994511 и СППС ТУ 2296-016-20994511.

Для испытания СПА анкерный стержень закрепляют в разрезные втулки и для предотвращения контакта с металлическим захватом производят засыпку сухим цементом. Образец разрушается в захвате при значениях прочности ниже расчетных. Методика испытания СППС заключается в растяжении образца, на который были установлены шайбы и произведена подмотка анкеров из композиционного материала.



ла, аналогичного материалу стержня. Испытания стеклопластиковых стержней с анкерными уширениями на концах также дают значения прочности, далекие от расчетных, т.к. разрушение образцов начиналось по краю шайбы в результате среза, но иногда образцы разрушались и в результате расслоения (в виде метелки) в средней части между захватами.

Таблица 1 – Результаты испытаний различных конструкций захватов на растяжение (расчетное значение прочности стеклопластика по правилу смесей 2000-2200 МПа)

Методика испытаний	Характер разрушения	$\sigma_p$ , МПа	V, %
в алюминиевых фрикционных накладках	обрыв в рабочей зоне	1350	13
в разрезных втулках - без засыпки - с сухим цементом - с алюминиевыми вкладышами	разрыв в зоне перехода цилиндрической части в коническую	800	15
		1200	12
		1300	10
вклеенный в захваты образец	разрыв в зоне расположения малого основания первого конуса	520-600	15
в наматываемых анкерах	срез по краю шайбы или обрыв в рабочей зоне	870-960	10
с применением расширяющегося цемента - для СПА - для СППС	разрыв в рабочей зоне, или в пределах захвата	1450	10
		810-970	20

Качество примененных устройств демонстрирует абсолютная величина результата испытаний, разброс значений (воспроизводимость) и характер разрушения. Наилучшие результаты в таблице 1, получены для оконцевателей в форме толстостенной трубы, заполненной расширяющимся цементом. Это приводит к плавному распределению напряжений без резкой концентрации. Разрушение происходит в средней части образца, при значениях прочности близких к расчетным.

Модернизация устройств для испытаний на растяжение круглых стержней позволила вдвое улучшить результат, по сравнению с результатами испытаний пластин по ГОСТ 11262-80, т.е. повысить точность измерения. Вместе с тем, и новые устройства для испытаний на растяжение не позволяют получить истинные значения прочности стержней из ПКМ круглого сечения и требуют соответствующих исследований и доработки для исследований прочности изделий другого класса и других размеров.

**Сжатие.** Было исследовано три различных захвата, основанных на механическом закреплении трех и одного образца, на вклеивании в специальные плунжеры образца для обеспечения соосности линии приложения силы и оси стержня при испытаниях. Результаты испытаний СПА-5,5 одинаковой длины с применением разных захватов приведены в таблице 2, так же в таблице приведены результаты испытаний СППС-12 вклеенных в плунжеры. Из таблицы видно, как сильно схема испытаний и захваты влияют на результат. Модернизация устройств для испытаний также позволило вдвое повысить абсолютное значение результата испытаний по сравнению с испытаниями пластин по ГОСТ 4651-82, но разрушение образцов так-

же как и при сжатии происходит в захватах в месте концентрации напряжений, и результаты далеки от теоретических.

Таблица 2 - Результаты испытаний стеклопластиковых стержней на сжатие

Образец и схема испытаний	Характер разрушения	$\sigma_c$ , МПа	V, %
сжатие трех цилиндрических образцов СПА-5,5	излом по краю захвата	600	15
схема испытаний по ГОСТ 4651-82 адаптированная для СПА-5,5	излом по краю захвата	800	10
СПА-5,5, испытание «по направляющей»	излом со сдвигом под углом 45° в рабочей части	1060	8
СППС-12, испытание «по направляющей»	срез по витку, осевое расслоение	500	8

Устойчивость сжатых стержней и установление зависимости критического напряжения от гибкости является важным разделом механики деформируемых систем. Значение предельной гибкости, при которой справедлива формула Эйлера, определены эмпирически для большинства материалов – чугуна, стали, дерева. Поэтому были проведены такие исследования для стеклопластиковых стержней различных геометрических размеров с разными видами заделки (рисунок 1).

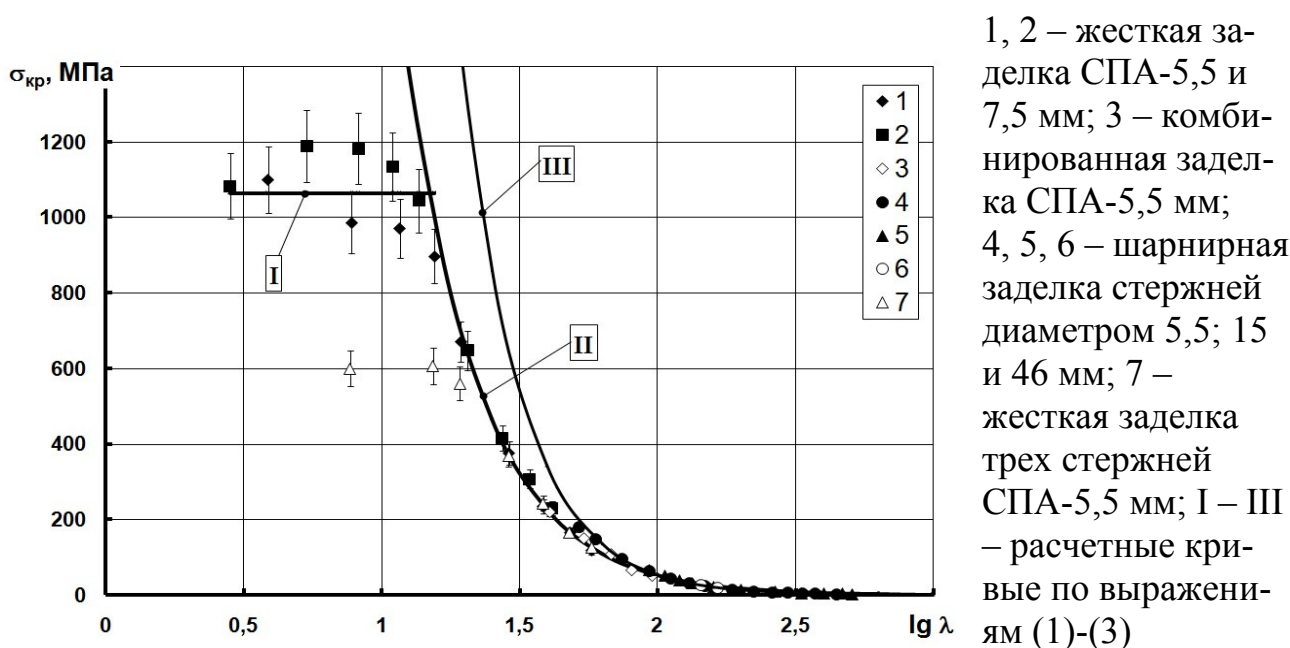


Рисунок 1 - Зависимость критического напряжения от гибкости стеклопластиковых стержней при осевом сжатии

Для коротких стержней с малой гибкостью ( $3 < \lambda < 16$ ) характерна зона с постоянным значением критического напряжения, определяемого по формуле:

$$\sigma_{кр} = \sigma_c \cdot \lambda^0, \quad (1)$$

где  $\sigma_c = 1060$  МПа – прочность при сжатии (таблица 2).

Далее с увеличением гибкости ( $16 < \lambda < 105$ ) происходит потеря устойчивости стержней средней длины при нагрузках, меньших рассчитанных по формуле Эйлера, для расчета критических напряжений в этой зоне предложено выражение:

$$\sigma_{кр} = A \cdot E \cdot \lambda^b, \quad (2)$$

где  $A=1,38$ ;  $b=-1,58$  – эмпирические коэффициенты;  $E$  – модуль упругости, МПа.

И наконец, третья зона, в которой потеря устойчивости длинных стержней полностью соответствует формуле Эйлера. Значение предельной гибкости можно определить как точку пересечения соответствующих кривых:  $\lambda_{пред}=105$ . Критическое напряжение в этой зоне определяется по известному выражению:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 \cdot E \cdot \lambda^{-2} \quad (3)$$

Следует отметить, что разбросы результатов испытаний при малой гибкости высоки до 10-15 %, а по мере ее увеличения они уменьшаются до 1-2 %. Такие разбросы обусловлены несовершенством захватов и определяющими критериями: прочность для коротких образцов, комбинация прочности и модуля упругости - для средних, и модуль упругости для длинных образцов, которые теряют устойчивость без разрушения. Практические расчеты коротких и средних стеклопластиковых стержней на устойчивость необходимо вести по выражениям (1), (2) с учетом доверительного интервала  $(1 - 1,65 \cdot V_\sigma)$ , в котором коэффициент вариации определяется в зависимости от гибкости эмпирической формулой  $V_\sigma = 0,56 \cdot \lambda^{-0,79}$ .

В результате анализа рисунка 1 использованы в ходе дальнейшей работы следующие зоны:  $3 < \lambda < 5$  – для испытаний на влияние заделки при сжатии (по ГОСТ4651 диапазон гибкости при испытаниях на сжатие от 6 до 10),  $\lambda > 105$  – для продольного изгиба (результаты использованы для определения эффективного диаметра стержней СППС и при создании устройства для комплексных длительных испытаний).

**Продольный изгиб.** Метод продольного изгиба разработан и внедрен в лаборатории Бийского завода стеклопластиков. Сущность метода заключается в продольном изгибе шарнирно опертого образца, с регистрацией нагрузки  $F$  и прогиба образца в средней части  $f$ , который определяют расчетным способом, зная величину взаимного сближения концов  $\Delta$ .

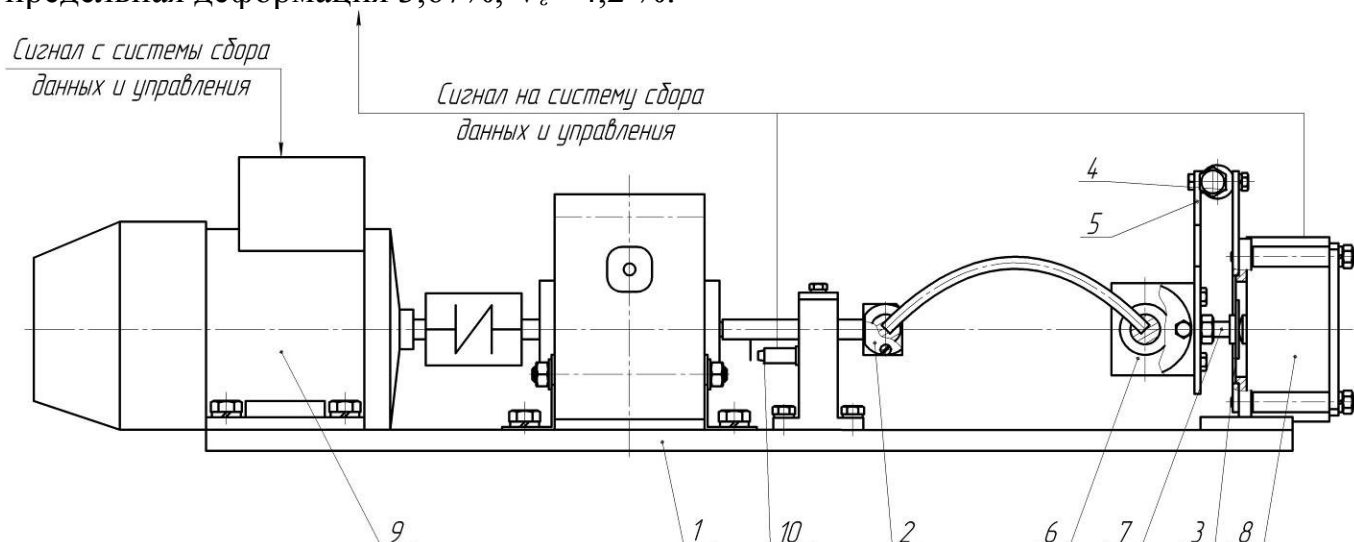
Существующие установки имели вертикальное расположение оси стержня и скользящий узел крепления опоры к силоизмерителю. В работе модернизирована конструкция автоматизированной установки испытаний на продольный изгиб (рисунок 2).

Место крепления неподвижной шарнирной опоры в данной конструкции обеспечивает шарнир 4, который отстоит от места соприкосновения опоры с датчиком силы.

Основным отличительным признаком данной конструкции опоры является минимизация потерь на трение в узлах передачи нагрузки от образца к датчику за счет установки шарнира (трение качения), что повышает точность получаемых результатов на 0,5 % по сравнению с существующими установками.

Изготовлены и внедрены установки для испытаний стержней диаметром от 4 до 8 мм длиной до 300 мм, и отдельно для испытаний образцов диаметром от 10 до 46 мм длиной от 360 до 2000 мм. Проведена апробация установок на испытаниях круглых стержней постоянного и периодического профиля, и испытаниях стекло- и углепластиковых пластин. Результаты испытаний на продольный изгиб, например, для стержней, прочность которых при растяжении и сжатии представлена в таблицах 1 и

2, следующие: прочность – 2030 МПа,  $V_{\sigma}=4,2\%$ , модуль Юнга – 56,8 ГПа,  $V_E=3,5\%$ , предельная деформация 3,67%,  $V_{\epsilon}=4,2\%$ .



1 – горизонтальное основание, 2 – подвижная шарнирная опора, 3 – вертикальная стойка, 4 – шарнир, 5 – кронштейн, 6 – неподвижная шарнирная опора, 7 – нагружающий наконечник, 8 – силоизмерительный датчик, 9 – электродвигатель, 10 – датчик перемещений

Рисунок 2 - Схема автоматизированной установки испытаний на продольный изгиб

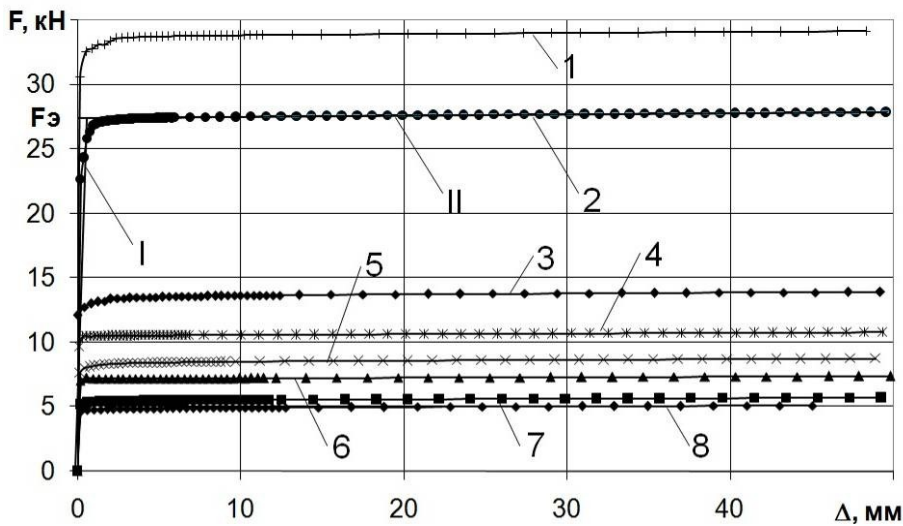
Результаты показывают преимущество данного метода по сравнению с растяжением и сжатием, разрушение образца происходит в средней части, что исключает влияние захватов на результат.

При осевом сжатии гибких стержней с шарнирной заделкой происходит резкое возрастание нагрузки и потеря устойчивости, после чего стержень подвергается продольному изгибу с незначительным повышением усилия при больших значениях деформации (прогиба). Это поведение стеклопластиковых стержней соответствует теоретическому для линейно-упругого тела, однако точное определение величины критической силы потери устойчивости представляет определенные экспериментальные сложности, особенно для стержней периодического профиля.

В настоящей работе предложена методика экспериментального определения величины  $F_{\Sigma}$ , как границы резкого перехода из докритической области в область продольного изгиба (рисунок 3). Величина критической эйлеровой силы определяется эмпирически, как точка пересечения двух прямых, аппроксимирующих участки I и II, соответственно. Полученная эмпирическая диаграмма нагружения и методика использованы для обоснования и расчета устройства испытания долговечности СПА и определения механических свойств СППС.

Учитывая экспериментальные исследования устройств для испытаний на растяжение и сжатие, их недостатки, предложено исходные механические характеристики материала определять методом продольного изгиба, а влияние оконцевателей при растяжении/сжатии учитывать понижающим коэффициентом.

Данный метод был успешно применен для испытаний СППС. Учитывая приведенные в главе 2 выводы, в качестве базового метода для испытаний на долговременную прочность был принят метод продольного изгиба.



I – докритическая область;  
 II – область продольного изгиба (рабочий участок диаграммы);  
 1 - 8 стержни диаметрами: 46, 36, 26, 22, 20, 18, 16, 15 мм, соответственно

Рисунок 3 - Диаграммы нагружения продольным изгибом стеклопластиковых стержней различных диаметров при постоянном отношении длины к диаметру  $L/d=36$

Следует отметить воспроизводимость результатов, оперативность контроля, простоту, возможность автоматизации испытаний и высокую производительность данного метода испытаний.

**Методика определения эффективного диаметра СППС.** При определении механических свойств СППС возникает проблема точного измерения диаметра, который необходимо использовать при расчетах, и для данного вида изделий была разработана оригинальная методика по определению эффективного диаметра, основанная на использовании результатов измерения характеристики (коэффициента) жесткости стержня  $k_1 (Ed^2)$ , характеризующей удлинение стержня при приложении растягивающей силы, и характеристики жесткости этого же стержня  $k_2 (Ed^4)$ , характеризующей его сопротивление продольному изгибу.

Коэффициент жесткости при растяжении рассчитывают исходя из закона Гука:

$$\sigma = \epsilon E = 4F / (\pi d^2), \quad (3)$$

откуда,

$$k_1 = (4/\pi) \cdot \partial F / \partial \epsilon, \quad (4)$$

где  $\partial F / \partial \epsilon$  – тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей зависимость нагрузки от деформации.

Коэффициент жесткости при продольном изгибе рассчитывают исходя из формулы Эйлера:

$$F_3 = \pi^3 E d^4 / (64 L^2), \quad (5)$$

откуда,

$$k_2 = 64 \cdot F_3 \cdot L^2 / \pi^3, \quad (6)$$

где  $F_3$  – сила Эйлера, Н.

Принимая гипотезу о равенстве жесткости (модуля упругости материала) стержня при нагружении растягивающей силой и при продольном изгибе, эффективный диаметр рассчитывают по формуле:

$$d_{\text{эф}} = (k_2 / k_1)^{1/2}, \quad (7)$$

В таблице 3 приведены значения диаметров определенных тремя различными методами и отклонение от предложенного метода. Предложенный метод определе-

ния диаметра наиболее точен при силовых измерениях механических свойств стержней, кроме того, по предложенной методике одновременно с диаметром определяют значение модуля Юнга и прочности стержня.

Таблица 3 - Результаты определения диаметра различными методами

Класс арматуры	Оптический метод		Гидростатический метод		Предложенный метод
	d, мм	$\Delta d$ , %	d, мм	$\Delta d$ , %	
Б-4	3,80	-6,86	4,08	0,00	4,08
Б-6	5,49	-13,68	6,30	-0,94	6,36
Б-12	12,03	-4,68	13,19	4,52	12,62
Б-16	15,71	-5,08	17,24	4,17	16,55
Л-5	4,73	5,35	5,22	16,26	4,49
Л-6	6,00	4,53	6,80	18,47	5,74
А-5	4,42	-1,12	4,87	8,95	4,47
А-7	6,87	-0,29	8,01	16,31	6,89
А-11	11,08	-3,99	11,47	-0,63	11,54

В третьей главе представлена разработка устройства и экспериментального метода испытаний анизотропных стеклопластиковых стержней и пластин из угле- и стеклопластика на долговечность при статических нагрузках, новизна которого состоит в общей совокупности и заданной последовательности проведения процедур, включающих:

- отбор представительной выборки образцов;
- деление выборки на две или более представительных групп;
- испытание временной прочности на одной из групп образцов;
- аппроксимацию полученного распределения наиболее достоверным аппроксимирующим выражением, обоснование выбора постоянного напряжения для испытаний на долговечность;
- испытание долговечности другой группы при заданных значениях напряжения, обеспечивающих разрушение большей части образцов за несколько месяцев, отведенных на эксперименты;
- аппроксимацию распределений для каждой группы наиболее достоверными аппроксимирующими выражениями;
- расчет приведенных значений напряжений для заданных значений долговечности с использованием аппроксимирующих значений прочности, действующего напряжения и долговечности, соответствующих равной вероятности разрушения;
- аппроксимацию математическим выражением зависимости между долговечностью и приведенными значениями напряжения, соответствующими заданной долговечности, построение силовых зависимостей;
- расчет длительной прочности по соответствующим значениям длительности действия эксплуатационной нагрузки.

При эксплуатации стеклопластиковые стержни подвергаются воздействию сжимающих, растягивающих и изгибных нагрузок и их комбинации. В литературных источниках преобладают мнения о проявлении разных по величине механических

свойств для разных видов нагружения как для кратковременных, так и длительных испытаний.

Представленные выше исследования послужили предпосылкой для создания устройства комплексных испытаний на долговечность при растяжении, сжатии и изгибе (рисунок 4). В качестве базового метода применен продольный изгиб, а для исследований влияния видов заделки при растяжении/сжатии на долговечность устройство имеет соответствующие приспособления, исследованные и описанные в главе 2.

Сущностью устройства является создание в одном из испытуемых образцов постоянной сжимающей нагрузки, а во втором равной по величине растягивающей, с помощью продольно изогнутых стержней, которые являются и нагружающим механизмом и испытуемыми образцами одновременно.

Способ испытаний реализуется на данном устройстве следующим образом. Для расчета геометрических параметров нагружающих образцов задают значение требуемого напряжения, и зная площадь сечения образца, испытываемого на сжатие/растяжение, рассчитывают требуемую нагрузку для его испытания по формуле:

$$F = \sigma_c \cdot S \quad (8)$$

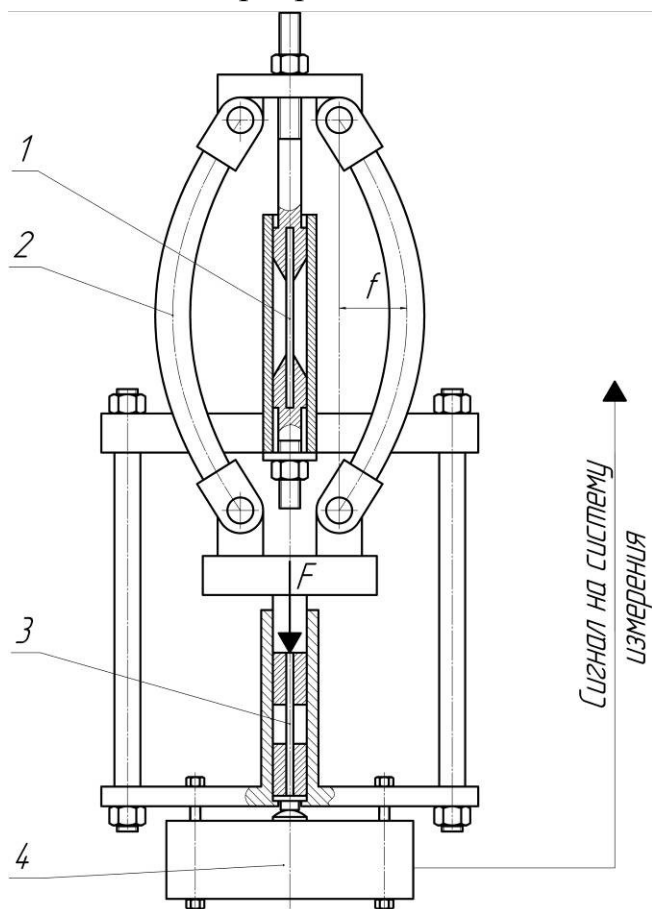
где  $F$  – нагрузка, Н;  $\sigma_c$  – напряжение в сжатом/растянутом образце, МПа;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Эту нагрузку испытывают образцы, нагружаемые на сжатие и растяжение, она определяется эйлеровой силой потери устойчивости образцов, нагружаемых на продольный изгиб. Продольно изогнутые стержни работают в области III, а испытуемые на сжатие – в области I (рис. 1).

Грубую настройку устройства ведут теоретически, используя формулу Эйлера (5) и I-й участок диаграммы нагружения для определения  $F$  (рисунок 3).

Для более точной настройки усилия со стороны продольно изогнутых стержней используется экспериментально установленный участок II диаграммы нагружения на рисунке 3.

При известной нагрузке, сечении и длине продольно изгибаемого стержня определяют величину прогиба стержня, обеспечивающую создание в нем требуемого напряжения:



1–3 – растянутый, продольно изогнутый и сжатый образцы,  
4 – силоизмерительный датчик

Рисунок 4 - Устройство комплексных испытаний на растяжение, сжатие и изгиб для измерений долговечности ПКМ

$$f = \frac{\sigma_{\text{ни}} \cdot w}{F}, \quad (9)$$

где  $f$ , мм – величина прогиба;  $\sigma_{\text{ни}}$ , МПа – требуемое напряжение продольного изгиба;  $w$ , мм<sup>3</sup> – осевой момент сопротивления сечения стержня.

Устройство позволяет проводить испытания на долговечность как в комплексе, так и при отдельных видах нагружения – растяжении, сжатии или продольном изгибе. Для этого образцы, не участвующие в испытаниях, заменяют вставками.

**Основные технические характеристики.** Количество нагружающих стержней – 2 шт., их диаметр – 20 мм, длина – 750 мм; количество испытуемых на сжатие/растяжение стержней – 5 шт., их диаметр – 5,2 мм; усилие нагружения – 18 кН. Для подтверждения длительной прочности при растяжении, сжатии и изгибе выполнены отдельные длительные испытания на устройствах, использующих фрагменты запатентованного технического решения.

Выше описанное устройство комплексных испытаний может быть использовано для определения долговечности при растяжении, сжатии и изгибе, как при нормальных условиях, так и при повышенной влажности, повышенной или пониженной температуре, воздействию агрессивных сред, а также при одновременном воздействии этих факторов. Устройство позволило снизить погрешность измерений прочности с 10-15 % до 3 %, и долговечности с 15-20 % до 5-8 %. Для длительных испытаний на осевое растяжение стеклопластикового стержня диаметром 5 мм требуется нагрузка 18 кН, которую задает испытательная машина ГРМ-1, в разработанном устройстве такая же нагрузка обеспечивается потенциальной энергией продольно изогнутых стержней при значительно меньших габаритах установки. Это позволяет расширить функциональные возможности устройства, повысить точность, снизить энергоемкость и габаритные размеры.

Для продольно изогнутого стержня исследовали величину релаксации усилия и изменения деформации (рост прогиба) в условиях длительного нагружения постоянной силой (рисунок 5). Оказалось, что для стержней с высоким содержанием наполнителя (до 80 % масс), величина релаксации и ползучести составляет не более 1 %, что позволяет пренебречь влиянием этих величин при длительных статических испытаниях на продольный изгиб.

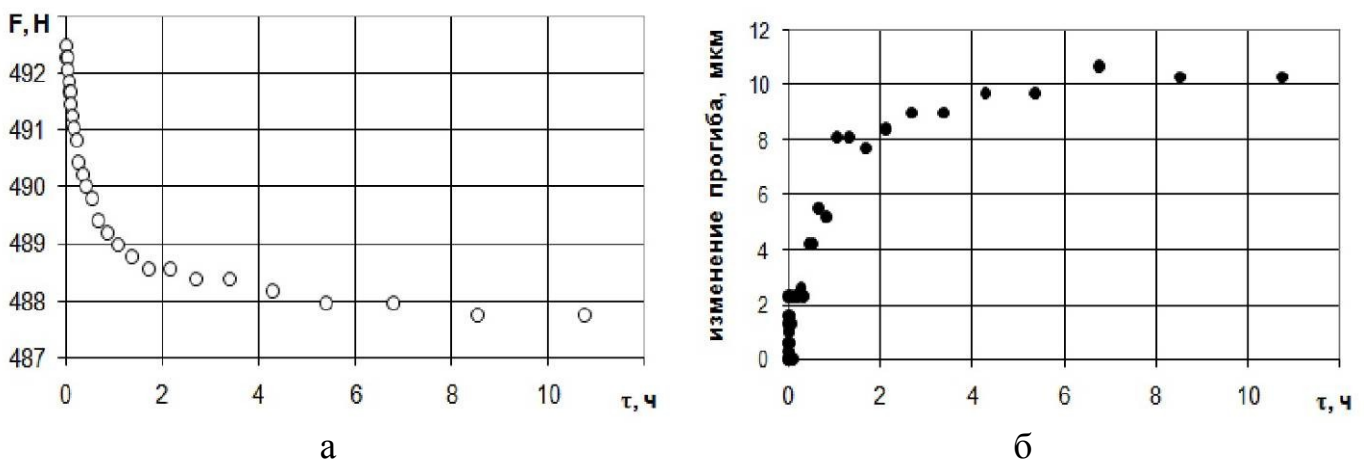


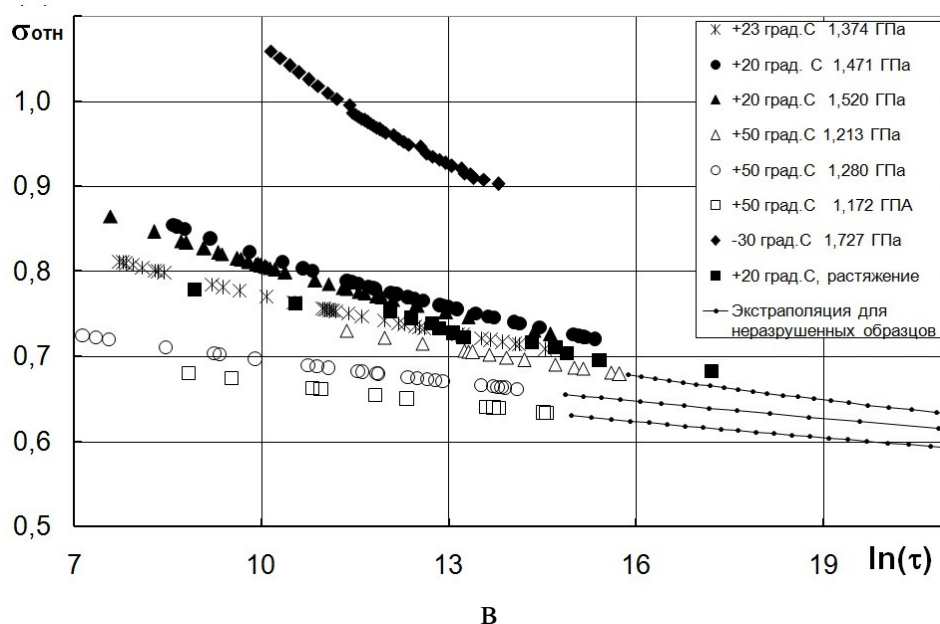
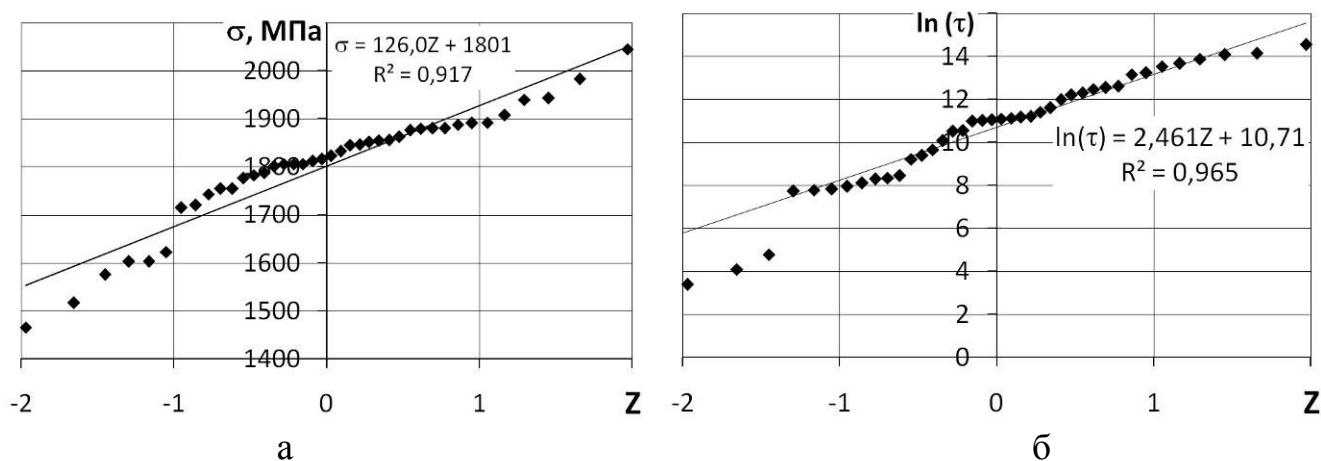
Рисунок 5 – Результаты измерения релаксации (а) и ползучести (б) стеклопластикового стержня при продольном изгибе



Количество образцов в группе для аппроксимации распределения прочности и долговечности рекомендуется не менее 15-ти, если закон распределения заранее не известен. С повышением объема выборки точность аппроксимации увеличивается, оптимальным количеством является 20 шт. С учетом того, что разбросы долговечности ПКМ значительно превышают разбросы прочности, для испытаний на долговечность выборка может быть увеличена до 40 образцов.

Предложенный метод математической обработки экспериментальных результатов измерения долговечности заключается в следующем:

- аппроксимация зависимости временной прочности (рисунок бa) и долговечности от вероятности разрушения (рисунок бб);
- расчет приведенных значений напряжений для заданных значений долговечности с использованием аппроксимирующих значений прочности, действующего напряжения и долговечности, соответствующих равной вероятности разрушения;
- аппроксимация математическим выражением зависимости между долговечностью и приведенными значениями напряжения, соответствующими заданной долговечности (рисунок бв).



а - распределения образцов по прочности ( $Z$  – обратная функция нормального распределения), б – распределение образцов по долговечности, в – силовые зависимости долговечности (время в с)

Рисунок 6 – Графическая иллюстрация метода математической обработки результатов

Из результатов выполненных в работе исследований свойств стеклопластиковых и базальтопластиковых стержней установлено, что закон распределения по прочности может быть близок к нормальному, экспоненциально-нормальному, или полиномиальному, при этом приведенный метод обработки не ставит целью определение закона распределения, а обладает универсальностью при поиске наиболее точной аппроксимирующей зависимости прочности от вероятности разрушения. Закон распределения по долговечности исследованных материалов наиболее близок к логарифмически-нормальному, что соответствует литературным данным.

При обработке результатов используется относительная величина приложенных напряжений, которая показывает, на какую долю от временной прочности нагружен каждый образец при длительных статических испытаниях. Это позволяет недостаток ПКМ – большие разбросы по прочности и долговечности – обратить в достоинство, учитывается каждый разрушенный образец, в то время как по ГОСТ 10145-81, принято усреднять результаты испытаний 10-20 образцов в одну точку.

Разработанный метод, устройства испытаний и способ обработки результатов нашли применение для исследований длительной прочности СПА диаметром 5,5 мм в диапазоне температур от -70 до +60°C, пластин из угле- и стеклопластиков.

**В четвертой главе** приведены примеры прикладных исследований для стеклопластиковых стержней БЗС, угле- и стеклопластиковых плит авиационного назначения. В итоге анализа результатов и требований, предъявляемых к изделиям, разработаны методы механических испытаний, учитывающие индивидуальные свойства и условия эксплуатации стержней.

Метод определения механических характеристик продольным изгибом был применен для испытаний пластин. Образцы размером 15x100 мм были вырезаны из плит, изготовленных Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ).

С помощью разработанных устройств были проведены сравнительные испытания стекло- и углепластиковых плит на растяжение, сжатие и продольный изгиб, результаты которых приведены в таблице 4. Графики нагружений пластин продольным изгибом приведены на рисунке 7.

Таблица 4 – Результаты определения прочности плит толщиной 2 мм

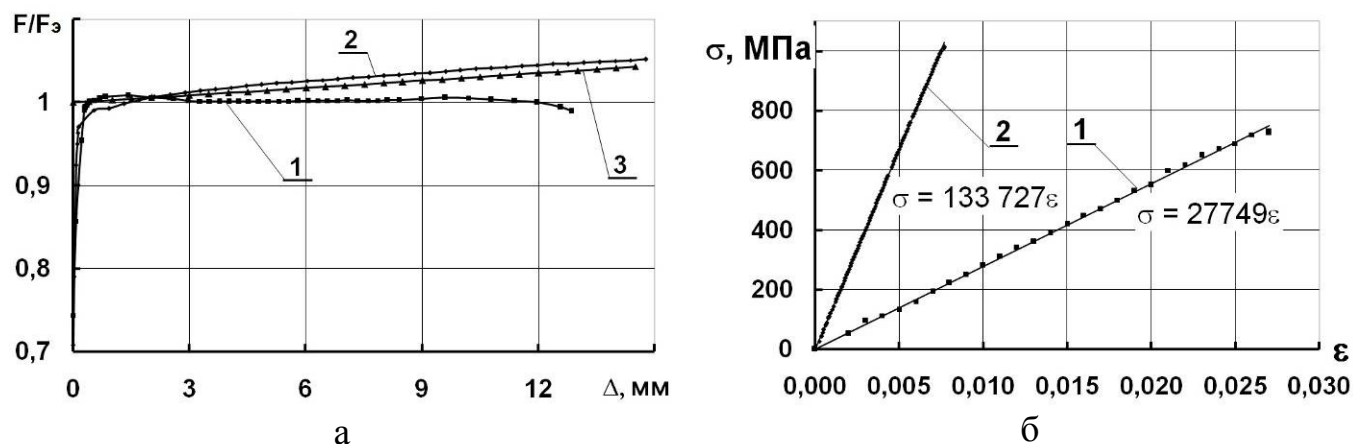
Вид испытаний	углепластик				стеклопластик			
	$\sigma_{ср}$ , МПа	V, %	E, ГПа	V, %	$\sigma_{ср}$ , МПа	V, %	E, ГПа	V, %
Растяжение ГОСТ25.601-80, ГОСТ 9550-80	213*	14,4	135	9,0	547*	20,8	-	-
Сжатие ГОСТ 25.602-80	1080	3,2	-	-	715	12,2	-	-
Продольный изгиб	1101	5,3	133	1,6	693	4,8	26,8	2,6
Длительная прочность	0,9 $\sigma$	8,5	-	-	0,6 $\sigma$	10,2	-	-

Примечание. \*Разрушение в захвате

Полученные результаты показывают, что при испытаниях высокопрочных армированных пластин возникают те же проблемы, что и при испытаниях стержней –

разрушение в захватах при растяжении и сжатии, высокие разбросы и отсутствие воспроизводимости результатов.

При испытаниях на продольный изгиб пластин получены более высокие значения механических свойств при минимальном разбросе. По диаграммам нагружения (рисунок 7) можно заключить, что пластины из углепластика более точно соответствуют поведению линейно-упругого тела, чем стеклопластиковые.



1 – стеклопластик, 2 – углепластик; 3 – расчетные значения

Рисунок 7 - Графики зависимостей  $F/F_0-\Delta$  (а) и  $\sigma-\epsilon$  (б) при нагружении пластин продольным изгибом

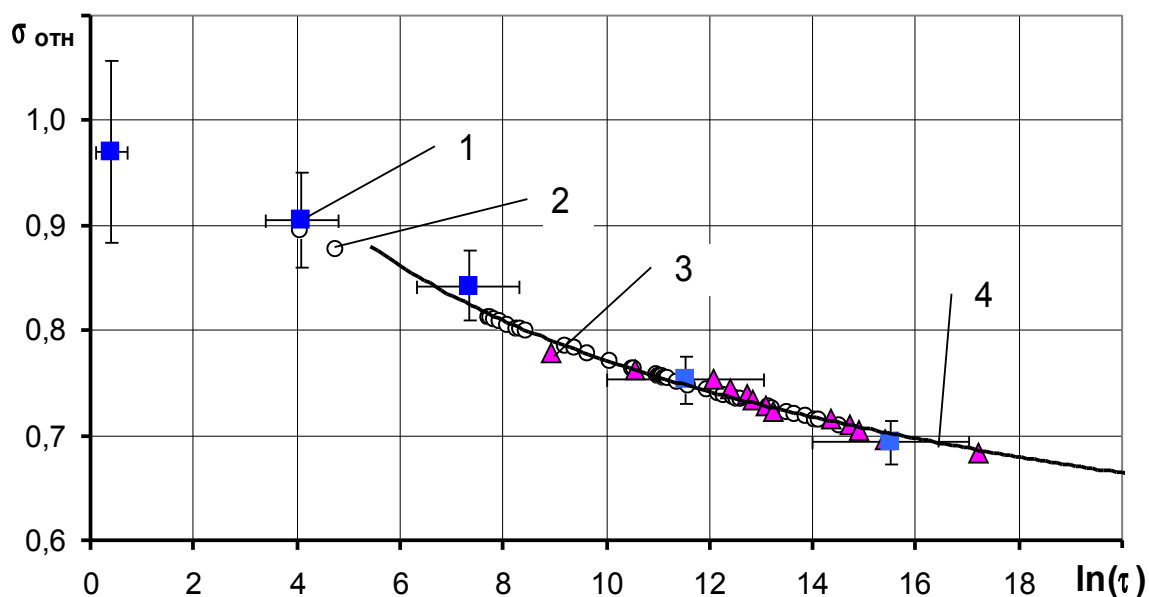
Для определения долговечности пластин используют устройство комплексных испытаний (рисунок 4), позволяющее задать и длительно поддерживать на испытуемом образце требуемое по программе значение сближение шарнирно опертых концов, соответствующее требуемому значению напряжений в образце.

При продольном изгибе образцы для испытаний не требуют трудоемкой подготовки, при этом результаты испытаний не искажены механической обработкой материала; разрушение образцов происходило в пределах рабочей зоны; в одном опыте можно получать значения максимально большого количества механических характеристик стержня; метод прост в осуществлении.

Разработанные методы и устройства использованы на БЗС для испытаний СПА на долговечность в процессе выполнения данного диссертационного исследования. Метод для определения силовых зависимостей долговечности был опробован в лаборатории БЗС для исследования длительной прочности однонаправленных стержней СПА диаметром 5,5 мм и для испытаний стеклопластиковых плит авиационного назначения (рисунок 8). Результаты испытаний, проведенных и обработанных предлагаемым методом дают значения длительной прочности около 0,63, совпадающие для растяжения и продольного изгиба. Таким образом, испытания образцов предлагаемым методом дают достоверные результаты, соответствующие литературным данным, обладают простотой, малой трудоемкостью и не требуют большого времени на проведение эксперимента. Достоверность данных доказана воспроизводимостью результатов, полученных в нескольких независимых организациях: БЗС (продольный изгиб, сжатие), ФГУП «СибНИА» (растяжение, продольный изгиб), ИЦ «СибНИИСтрой» (продольный изгиб).

При исследовании временной прочности было показано, что сжатие и растяжение дают неточные результаты. Поэтому в настоящей работе предложено длитель-

ную прочность рассчитывать от временной, определенной методом продольного изгиба, для случая сжатия и растяжения уточнять понижающим коэффициентом, затем учитывать влияние температуры на прочность, и затем – влияние длительности приложения нагрузки.



1 - пластины на продольный изгиб; 2 - стержни на продольный изгиб;  
3 – стержни на растяжение; 4 – аппроксимирующее расчетное выражение

Рисунок 8 - Результаты длительных испытаний при комнатной температуре, время в секундах

Для расчета длительной прочности в исследованном диапазоне температур, не превышающих 60 °С, предложено эмпирическое выражение:

$$\sigma_{\text{дл}} = \sigma_{\text{в}} \gamma_3 \gamma_T \gamma_{\tau}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – исходная прочность при продольном изгибе, МПа;  $\gamma_3$  – коэффициент, учитывающий влияние условий заделки (например для СПА диаметром 5,5 мм при сжатии 0,4-0,5, при растяжении 0,6-0,9);  $\gamma_T$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры, выражение (11);  $\gamma_{\tau}$  – коэффициент, учитывающий влияние длительности приложения нагрузки, выражение (12):

$$\gamma_T = 270T^{-0,98}, \quad (11)$$

$$\gamma_{\tau} = 1,27(\ln\tau)^{-0,21}, \quad (12)$$

где  $T$  – температура, °К,  $\tau$  - время, с.

Таким образом, разработаны и внедрены в производство метод и устройства для определения долговечности ПКМ, расширена область применения метода продольного изгиба для измерения механических свойств не только упругих однонаправленных стеклопластиковых стержней, но также и плоских образцов из углепластиковых плит и стеклопластиковых стержней периодического профиля; разработана оригинальная методика по определению эффективного диаметра, основанная на использовании результатов измерения жесткости стержня, характеризующей удлинение стержня при приложении растягивающей силы, и жесткости этого же стержня, характеризующей его сопротивление продольному изгибу.

**В приложениях** представлены результаты испытаний стеклопластиковых стержней на растяжение и сжатие, методики испытаний, разработанные в результате диссертационных исследований и введенные в ТУ 2296-016-20994511 и ТУ 2296-001-20994511, приведены акты внедрения разработанных способа и оборудования для испытаний анизотропных стеклопластиков в ООО «БЗС» (г. Бийск), и в учебный процесс кафедры «Физика и технология композиционных материалов» в АлтГТУ (г. Барнаул). Приведен диплом VIII-ой Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи («НТТМ-2008», г. Москва) и диплом за победу в конкурсе научно-исследовательских работ «Химия высокомолекулярных соединений, полимеры и композиционные материалы на их основе» (Бийск, 2010).

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработано и создано экспериментальное устройство комплексных испытаний на растяжение, сжатие и продольный изгиб для измерений долговечности ПКМ.
2. Разработан новый метод определения долговечности анизотропных ПКМ. Проведена апробация предложенных устройства и метода на испытаниях стеклопластиковых стержней, стекло- и углепластиковых пластин, и получены эмпирические закономерности для расчета длительной прочности.
3. Установлена зависимость критического напряжения от геометрических размеров и вида закрепления концов стержня при испытаниях на сжатие. С помощью полученных эмпирических зависимостей спроектированы устройства для испытаний на долговечность и измерения механических свойств стеклопластиковых стержней при растяжении, сжатии и продольном изгибе.
4. Модифицировано устройство для испытаний на продольный изгиб с помощью установки шарнирной опоры в узле измерения усилия, позволяющей повысить точности результатов измерений. Проведена апробация устройства и метода продольного изгиба для испытаний стеклопластиковых стержней постоянного круглого и периодического сечения, стекло- и углепластиковых пластин.
5. Разработана и внедрена оригинальная методика по определению эффективного диаметра стержней периодического профиля, основанная на использовании результатов измерения жесткости стержня при растяжении с использованием экспериментальных измерений эйлеровой критической силы при продольном изгибе.
6. Предложена методика расчета длительной прочности стеклопластиковых стержней, основанная на математической обработке результатов измерений исходной прочности и долговечности.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Блазнов, А.Н. Исследование прочности и устойчивости однонаправленных стеклопластиковых стержней при осевом сжатии / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков, В.Б. Тихонов // *Механика композиц. матер. и констр.* – 2007. – Т.13. – № 3. – С. 426-440.
2. Савин, В.Ф. Метод построения силовых зависимостей долговечности для стержней из полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, А.Л. Верещагин, А.Н. Блазнов, А.Н. Луговой, В.Б.Тихонов, О.В. Быстрова // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.*– 2008. – Т. 74. – № 8. – С. 58-62.
3. Тихонов, В.Б. Устройство для комплексных испытаний долговечности материалов / В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин // *Приборы и техника эксперимента.* – 2010. – № 3, с. 166-167.
4. Тихонов, В.Б. Метод испытаний стеклопластиков на статическую долговечность / В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.*– 2010. – Т. 76. – № 9. – С. 63-67.
5. Поздеев, С.П. Способ испытаний упругих стержней на долговечность и устройство для его осуществления / С.П. Поздеев, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, В.Б. Тихонов, Н.М. Киселев // Пат. РФ № 2357223. Оpubл.27.05.2009, бюл. №15.
6. Блазнов, А.Н. Зависимость критического напряжения от гибкости стеклопластиковых стержней / А.Н. Блазнов, В.Б. Тихонов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков // *Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всерос. науч.-практ. конф.* – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2007. – С 140-144.
7. Битков, Е.Н. Влияние температуры на механические характеристики стеклопластиковых стержней / Е.Н.Битков, В.Б.Тихонов, А.Н.Блазнов, В.Ф.Савин // *Полимеры, композиционные материалы и наполнители для них («Полимер-2007»): Материалы I-ой Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 25-26 мая 2007 года.* - Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – С 20-22.
8. Тихонов, В.Б. Метод и установка для испытаний строительной арматуры из полимерных композиционных материалов / В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, А.Н. Луговой // *Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VIII Всерос. науч.-практ. конф.* – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С 142-146.
9. Савин, В.Ф. Метод испытаний на долговечность и построение силовых зависимостей для однонаправленных стеклопластиков / В.Ф. Савин, В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, А.Л. Верещагин // *Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VIII Всерос. науч.-практ. конф.* – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С 146-152.
10. Тихонов, В.Б. Способ и устройство комплексных испытаний полимерных композиционных материалов на долговечность / В.Б.Тихонов, А.Н.Блазнов, В.Ф.Савин // *Полимеры, композиционные материалы и наполнители для них («Полимер-2008»): Материалы II -ой Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 23-25 мая 2008 г.* - Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 46-49.
11. Тихонов, В.Б. Оборудование для испытаний на долговечность упругих стеклопластиковых стержней / В.Б.Тихонов, А.Н.Блазнов, В.Ф.Савин // *Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: Материалы Все-*

российской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (15-16 мая 2008 г., г. Бийск). – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С. 67-75.

12. Волков, Ю.П. Стержни стеклопластиковые периодического профиля для применения в строительстве / Ю.П.Волков, А.Н.Луговой, В.Ф.Савин, О.В.Быстрова, В.Б.Тихонов // Доклады IX Всерос. науч-практ. конф. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 124-127.

13. Волков, Ю.П. Оборудование для натяжения стеклопластиковой арматуры при создании предварительно напряженных бетонных конструкций / Ю.П.Волков, А.Н.Луговой, В.Ф.Савин, О.В.Быстрова, В.Б.Тихонов, Б.И. Глотов // Доклады IX Всерос. науч-практ. конф. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2009. – С 127-129.

14. Тихонов, В.Б. Исследование релаксации стеклопластиковых стержней при продольном изгибе / В.Б.Тихонов, А.Н.Блазнов, В.Ф.Савин // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: материалы Всероссийской научно-практической конференции 24 сентября 2009 года / под ред. Г.В. Леонова; Алт. гос. техн. ун-та, БТИ. - Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 422-425 с.

15. Тихонов, В.Б. Механические характеристики композитных стержней периодического профиля / В.Б.Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф.Савин, А.Н.Луговой, Ю.П.Волков // Доклады X Юбилейной Всерос. науч-практ. конф. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2010. – С 176-181.

16. Тихонов, В.Б. Исследование релаксации и ползучести стеклопластиковых стержней / В.Б. Тихонов, А.Н. Блазнов, М.Ю. Локтев, В.Ф. Савин // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с Международным участием (28-30 апреля 2010 г., г. Бийск). В 2-х ч.; ч.1. Алт. гос. техн. ун-та, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 119-121.

17. Рудольф, А.Я. Перспективные методы испытаний армированных пластиков / А.Я.Рудольф, В.Ф.Савин, А.Н. Блазнов, О.В.Старцев, В.Б.Тихонов // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. Доклады Международной конференции «Композит-2010» 30 июня – 2 июля 2010г. – Саратов: СГТУ, 2010. – С 119-122.

18. Тихонов, В.Б. Испытания на долговечность пластин и стержней из полимерных композитов / В.Б.Тихонов, А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. Доклады Международной конференции «Композит-2010» 30 июня – 2 июля 2010г. – Саратов: СГТУ, 2010. – С 221-224.

19. Loktev M. Ju. Automated electronic system for measuring the mechanical characteristics of fiberglass rods of circular cross-section tests for strength / M.Ju. Loktev, D.A.Ermolaev, V.F.Savin, A.Ya.Suranov, V.A. Abanin, V. B. Tikhonov // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceeding (EDM-2010, Er-lagol, Altay – June 30 – July 4, 2010). NTSU Publishing Polygraph Center, Novosibirsk State Technical University, 2010. – P. 151-154.

