

УДК 678.7: 629.5

ГРНТИ 61.61.29: 55.45.13



**ТРЯСУНОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ**

**Полимерные композиционные материалы на основе винилэфирных смол и вакуумная технология изготовления на их основе современных судовых корпусных конструкций**

Специальность: 05.16.09 – «Материаловедение» (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии  
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных  
материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального  
исследовательского центра «Курчатовский институт»

Научный            Доктор технических наук  
руководитель:    **Анисимов Андрей Валентинович**

Официальные    **Юдин Владимир Евгеньевич**  
оппоненты:        Доктор физико-математических наук, доцент  
ФГБУН «Институт высокомолекулярных соединений  
Российской академии наук», главный научный сотрудник

**Скопинцев Игорь Викторович**  
Кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Московский политехнический институт»,  
заведующий кафедрой «Техника и технология полимерных  
материалов»

Ведущая            **Федеральное государственное бюджетное**  
организация:        **образовательное учреждение высшего образования**  
**«Санкт-Петербургский государственный**  
**технологический институт (технический университет)»**

Защита диссертации состоится «31» октября 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на  
заседании диссертационного совета Д411.006.01 созданном на базе  
Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный  
научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»  
имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул.  
Шпалерная, д.49.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:  
<http://dissovet.crism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=25>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д411.006.01  
Заслуженный деятель науки РФ,  
д.т.н., профессор



В.А. Малышевский

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Полимерные композиционные материалы (далее – ПКМ) получили широкое применение в качестве конструкционных материалов в судостроительной отрасли для изготовления спасательных шлюпок, катеров, яхт, лодок и отдельных корпусных конструкций, устанавливаемых на судах и кораблях с корпусом из металла, начиная с 60-х годов XX века благодаря немагнитности, малому весу, высоким удельным прочностным характеристикам, стойкости к эксплуатационным воздействиям. Отличительной особенностью ПКМ является возможность получения многофункционального материала уже непосредственно при изготовлении конструкций.

Одной из задач современного судостроения является постройка судов и кораблей из ПКМ с длиной корпуса свыше 70 м, что определяет повышенные требования к характеристикам используемых ПКМ в части прочности, огнестойкости и обитаемости конструкций. Выполнение таких требований возможно за счет применения современных связующих на основе огнестойких винилэфирных смол и мультиаксиальных (продольно-поперечно-диагональных) армирующих материалов различной химической природы (стекло-, угле-, органотканей), комбинирование которых позволяет создавать гибридные ПКМ (ГПКМ).

Изготовление крупногабаритных судовых корпусных конструкций из ПКМ возможно двумя методами: контактным формованием и закрытым вакуумным. Контактное формование характеризуется высокой долей ручного труда, что влияет на качество изготавливаемого материала, а также не позволяет существенно увеличить объем серийного производства и снизить стоимость конечной продукции. Следует отметить еще один недостаток данного метода – выделение из полимерных связующих низкомолекулярных токсичных веществ в атмосферу рабочей зоны и окружающую среду. Применение современных вакуумных методов формования – а именно метода вакуумной инфузии позволит получить ПКМ, обладающие высокой долей объемного армирования, что в итоге приведет к повышению физико-механических свойств и снижению материалоемкости, а размер изготавливаемой крупногабаритной конструкции будет ограничиваться только размерами оснастки. Успешное применение метода вакуумной инфузии возможно при использовании смол с низкой динамической

вязкостью и армирующих материалов с высокой проницаемостью. В связи с этим, актуальной задачей является разработка ПКМ и ГПКМ на основе современных армирующих материалов и винилэфирных смол, и технологии изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций методом вакуумной инфузии, а также определить режимы отверждения для обеспечения максимальных прочностных свойств материала и одновременно с этим обеспечить замещение импортных армирующих материалов отечественными, что позволит снизить конечную стоимость ПКМ и зависимость от иностранных поставщиков.

**Целью работы** является разработка конструкционных полимерных композиционных материалов и технологии их переработки в крупногабаритные изделия методом вакуумной инфузии в обеспечение строительства судов и кораблей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Обоснование и выбор армирующих, связующих материалов для изготовления ПКМ и ГПКМ судостроительного назначения с требуемым уровнем физико-механических свойств, удовлетворяющих комплексу предъявляемых требований по технологичности применения в методе вакуумной инфузии,

2. Исследование влияния армирующих и связующих материалов на процесс пропитки ПКМ.

3. Разработка технологии и схем пропитки для изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций из ПКМ методом вакуумной инфузии.

4. Расчет времени процесса пропитки типовых крупногабаритных судовых корпусных конструкций из ПКМ при их изготовлении методом вакуумной инфузии.

5. Определение теплофизических характеристик связующих и разработка метода определения режимов термообработки ПКМ и крупногабаритных судовых корпусных конструкций на основании значений температуры стеклования связующего.

6. Проведение комплекса экспериментальных исследований физико-механических свойств ПКМ и ГПКМ на основе армирующих материалов различной химической природы.

7. Отдельной задачей является замещение импортных армирующих материалов, используемых при изготовлении судовых корпусных конструкций, на армирующие материалы отечественного производства.

### **Научная новизна работы.**

1. Установлены закономерности влияния армирующих и связующих материалов с коэффициентами проницаемости до  $10 \times 10^{-11}$  м<sup>2</sup> и динамической вязкости до 1,0 Па·с на время и длину пропитки армирующих материалов в методе вакуумной инфузии, обеспечившие возможность изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций.

2. Предложен экспресс-метод определения режимов термообработки ПКМ и крупногабаритных судовых корпусных конструкций на основании значений температуры стеклования связующего с использованием дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Установлено, что температура термообработки в пределах 60-100 °С оказывает более существенное влияние на степень отверждения винилэфирного связующего, чем увеличение продолжительности термообработки при меньшем значении температуры, за счет более высокой скорости полимеризации. Оптимальными являются температура, соответствующая температуре стеклования связующего, и время выдержки не менее 8 часов.

3. Разработаны новые ПКМ и ГПКМ для судо- и кораблестроения на основе армирующих материалов различной химической природы, в том числе отечественного производства, и винилэфирных смол, по физико-механическими и эксплуатационными свойствами не уступающие зарубежным аналогам. Наиболее оптимальным является использование гибридных структур, позволяющее получить материал с требуемым уровнем физико-механических свойств и провести качественную пропитку армирующих материалов различной химической природы методом вакуумной инфузии.

4. Экспериментальным путем определены значения физико-механических характеристик новых ПКМ и ГПКМ на основе армирующих материалов

различной химической природы, в том числе отечественного производства, и винилэфирных смол. Доказано экспериментально, что использование метода вакуумной инфузии в сравнении с методом контактного формования при изготовлении ПКМ на основе одних и тех же исходных армирующих компонентов позволяет повысить уровень физико-механических свойств материала на 15-45 % и регулировать их значения путем изменения значения уровня вакуума, при котором проводится пропитка армирующего материала.

5. Впервые в отечественном кораблестроении разработан технологический процесс изготовления за один цикл крупногабаритных конструкций из ПКМ и ГПКМ кораблей водоизмещением до 1000 тонн методом вакуумной инфузии с использованием обычной и секторной схем пропитки.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования технологических свойств армирующих и связующих материалов.

2. Результаты исследований степени отверждения связующих материалов и рекомендации по выбору режимов термообработки на основании значений температуры стеклования связующих методом ДСК.

3. Технологический процесс, схемы и расчет времени процесса пропитки для изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций из ПКМ методом вакуумной инфузии.

4. Результаты определения физико-механических свойств новых ПКМ и ГПКМ на основе армирующих материалов различной химической природы (стекло-, угле- и органотканей) на основе винилэфирной и эпоксидной смол.

#### **Практическая значимость результатов работы**

1. Разработана технология изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций методом вакуумной инфузии с применением различных схем пропитки адаптирована к условиям судостроительных заводов АО «СНСЗ», ЗАО «Пелла-Фиорд», ПАО «АСЗ», имеющих в своем составе «композитное» производство.

2. Разработана нормативно-техническая документация:

- технические условия ТУ 2296-123-07516250-2013 «Гибридный полимерный композиционный материал марок ГПКМИ-31 и ГПКМИ-ВЭ-ФАС»,

ТУ 2296-161-07516250-2015 «Материал полимерный композиционный марки РОП. Технические условия», ТУ 2296-162-07516250-2015 «Винилэфирный стеклопластик марки СВИ-9300. Технические условия», ТУ 2296-158-07516250-2015 «Трехслойный полимерный композиционный материал марки ТКИ-9300. Технические условия»;

- монтажная инструкция АЕИШ.112.001-2017 «Технологический процесс монтажа трехслойных панелей крыши докового комплекса пр.23380»;

- технология изготовления однослойных и многослойных ПКМ и ГПКМ РД 5.УЕИА.3648-2013 «Гибридный полимерный композиционный материал марок ГПКМИ-31 и ГПКМИ-ВЭ-ФАС. Технологический процесс изготовления методом инфузии. Инструкция»; РД 5.АЕИШ.3672-2017 «Трехслойные панели крыши докового комплекса. Технологический процесс изготовления методом вакуумной инфузии»; РД 5.АЕИШ.3664-2015 «Изготовление многослойного полимерного композиционного материала на основе эпоксидного связующего ЭКМ-70Т с наружными слоями из стеклопластика и средним слоем из органопластика. технологическая инструкция».

3. Разработанные материалы марок СВИ-9300, РОП заключениями НИИ КиВ ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» допущены к применению и успешно внедрены при строительстве заказов пр. 20386, 23380, а материал марки ТКИ-9300 решением МВК рекомендован к применению при строительстве заказа пр. 23380.

4. Разработанные ПКМ и ГПКМ могут быть использованы для создания различных изделий машиностроения.

**Достоверность** основных результатов, положений, выводов и рекомендации обеспечивается применением стандартных средств измерений и современных общепринятых методов (согласно ГОСТ) физико-механических испытаний.

**Личный вклад автора** заключается:

1. В постановке задач исследования, разработке методов и подходов к их решению, анализе полученных результатов и формулировке выводов.

2. В разработке и экспериментальном исследовании технологических свойств исходных компонентов ПКМ, физико-механических свойств новых ПКМ и ГПКМ.

3. В разработке и внедрении на АО «СНСЗ» технологии вакуумной инфузии, адаптированной для изготовления различных крупногабаритных корпусных конструкций, выполнении расчетов времени процессов пропитки с использованием различных схем (обычной и секторной).

4. В разработке экспресс-метода определения режимов термообработки ПКМ и крупногабаритных судовых корпусных конструкций на основании значений температуры стеклования связующего с использованием метода ДСК.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы были представлены на всероссийских и международных научных конференциях: Одиннадцатой конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); Двенадцатой конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); V международной конференции-школе по химической технологии (г. Волгоград, 2016 г.).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 2 в журналах из перечня ВАК и 2 патента на изобретения.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 155 наименований, 5 приложений, изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок, 43 таблицы, 30 формул.

#### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность разработки и применения новых ПКМ на основе винилэфирных смол и армирующих материалов различной химической природы для судостроения и метода вакуумной инфузии для изготовления крупногабаритных судовых корпусных конструкций на их основе. Приведены основные положения, выносимые автором на защиту, представлена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

**В первой главе** проведен аналитический обзор свойств различных исходных связующих и армирующих материалов различной химической природы, основных видов ПКМ (стекло-, угле-, органопластиков). Рассмотрены различные технологии изготовления ПКМ. Обосновывается применение винилэфирных смол вместо



полиэфирных для изготовления судовых корпусных конструкций, что позволяет при одних и тех же армирующих материалах и методе изготовления получить материал с более высокими прочностными и лучшими эксплуатационными свойствами. Сформулированы цель диссертационной работы и решаемые задачи.

**Во второй главе** приведены данные по основным исходным материалам для изготовления исследуемых ПКМ и ГПКМ – огнестойкой бромированой винилэфирной смоле марки Dion FR 9300 (Reichhold OY, Швеция), огнестойкой бромированой винилэфирной смоле марки Derakane Momentum 510C-350 (Ashland, США), огнестойкой фосакрилатсодержащей винилэфирной смоле марки ВЭ-ФАС (ООО «Волгоградпромпроект»), импортным и отечественным армирующим материалам различной структуры и химической природы (стекло-, угле-, органоткани) производства фирм Alhstrom (Финляндия), АО «Препрег-СКМ», ООО «НПП «ТЕРМОТЕКС», а также отверждающим компонентам.

Представлены использованные в диссертационной работе методы исследований, включающие определение динамической вязкости исходных смол, физико-механических характеристик ПКМ и ГПКМ: плотности, содержания связующего, водопоглощения, разрушающих напряжений при межслойном сдвиге, изгибе, сжатии, растяжении; модуля упругости (методика испытаний – изгибные колебания), модуля сдвига в плоскости и межслойного сдвига (методика испытаний – крутильные колебания); определение температуры стеклования образцов связующего и теплофизических процессов.

**Третья глава** посвящена определению режимов термообработки ПКМ и крупногабаритных конструкций на их основе с использованием метода дифференциально-сканирующей калориметрии. Выбранные режимы термообработки должны соответствовать технологическим возможностям заводов-строителей судов и кораблей из ПКМ. Эффективность соответствующего режима термообработки (или выдержки) определялась на основании разницы в значениях между температурами стеклования при первом и втором нагревах, а также между площадями экзотермических пиков отверждения. Исследовались образцы связующего на основе винилэфирных смол марок Dion FR 9300, Derakane Momentum 510C-350 и ВЭ-ФАС. Изготовление всех образцов осуществлялось методом вакуумной инфузии при уровне вакуума 10 кПа.

Образцы связующего на основе смолы марки Derakane Momentum 510С-350 изготавливались с применением двухкомпонентной отверждающей системы, состоящей из ускорителя марки NL51P и инициатора марки Trigonox 239, в том числе и с увеличенным количеством вводимых компонентов отверждающей системы для оценки влияния изменения количественного состава на степень отверждения связующего. Перед термообработкой образцы выдерживались при температуре 21 °С в течение 48 часов. Термообработка осуществлялась по двум режимам: 70 °С в течение 30 часов и 100 °С в течение 10 часов, после которой проводились соответствующие измерения. Результаты исследования образцов представлены в таблице 1. С увеличением количества вводимых компонентов отверждающей системы уменьшается температура стеклования, что указывает на уменьшение степени отверждения связующего. Разница между температурами стеклования при первом и втором нагревах составляет 4-6 °С, что указывает на высокую степень отверждения образцов и связано с высоким экзотермическим эффектом при полимеризации смолы. На термограммах при первом нагреве наблюдается релаксационный пик после области стеклования – следствие доотверждения при температуре ниже температуры стеклования без достижения равновесного состояния.

Т а б л и ц а 1. Результаты исследования образцов связующего марки Derakane Momentum 510С-350 методом ДСК.

Отверждающая система на 100м.ч. смолы	Режим термообработки	Температура стеклования, °С	
		1ый нагрев	2ой нагрев
Trigonox 239 – 2.0 м.ч. NL51 P – 0.1 м.ч. (рекомендована производителем Ashland)	Без термообработки	118,4	123,7
	70 °С 30 часов	118,3	122,5
	100 °С 10 часов	118,5	122,8
Trigonox 239 – 2.2 м.ч. NL51 P – 0.15 м.ч.	Без термообработки	116,6	120,4
	70 °С 30 часов	117,1	121,4
	100 °С 10 часов	117,7	122,2
Trigonox 239 – 2.4 м.ч. NL51 P – 0.2 м.ч.	Без термообработки	114,3	118,1
	70 °С 30 часов	114,6	119,4
	100 °С 10 часов	115,1	119,3

Образцы связующего на основе смолы марки Dion FR 9300 с изготавливались с рекомендованной производителем двухкомпонентной отверждающей системой (ускоритель марки Norpol 9802P – 3 м.ч. на 100 м.ч. смолы, инициатор марки Peroxide № 11 – 2 м.ч. на 100 м.ч. смолы) и выдерживались без термообработки с временем выдержки 7, 14 и 30 суток,

поскольку выдержка без термообработки применяется для стабилизации прочностных свойств ПКМ, после чего проводились соответствующие измерения. Одна серия образцов связующего на каждый период выдержки дополнительно выдерживалась под вакуумом 20 кПа в течение суток. Результаты исследования образцов связующего методом ДСК представлены в таблице 2. Разница в площадях экзотермических пиков образцов, выдержанных дополнительно при вакууме 20 кПа, и образцов, выдержанным под вакуумом только в рамках процесса вакуумной инфузии, различается лишь при минимальном времени выдержки. С увеличением времени выдержки разница в площадях экзотермических пиков уменьшается – для времени выдержки 30 суток разница в площадях экзотермических пиков составляет всего 0,78 Дж/г. Таким образом, дополнительная выдержка под вакуумом не способствует получению более отвержденного связующего и не обеспечивает дополнительных преимуществ при изготовлении ПКМ, а рекомендуемая температура термообработки – 70 °С.

Т а б л и ц а 2. Результаты исследования образцов связующего марки Dion FR 9300 методом ДСК со стандартной отверждающей системой

Режимы выдержки и термообработки	1ый нагрев		2ой нагрев
	Площадь пика, Дж/г	Температура стеклования, °С	Температура стеклования, °С
Дополнительная выдержка под вакуумом, выдержка 7 суток, без т/о	23,82	50,7	95,3
Выдержка 7 суток, без т/о	19,36	49,7	91,9
Дополнительная выдержка под вакуумом, выдержка 14 суток, без т/о	20,44	51,8	91,3
Выдержка 14 суток, без т/о	18,19	51,6	92,6
Дополнительная выдержка под вакуумом, выдержка 30 суток, без т/о	13,00	56,2	95,1
Выдержка 30 суток, без т/о	13,78	57,0	93,9

В производственных условиях АО «СНСЗ» из смолоподающих трубок отобраны образцы связующего на основе смолы Dion FR 9300 со стандартной отверждающей системой при изготовлении опытных конструкций тральщика пр.12700. Образцы термообрабатывались по режимам 70 °С 30 часов и 60 °С 12 часов + 80 °С в течение 48 часов – такой режим предложен для термообработки ПКМ, применяемых в обитаемых помещениях. Два образца выдерживались без термообработки в течение 35 суток. Температура стеклования образца с временем выдержки 35 суток при первом нагреве на 25 °С ниже температуры стеклования при втором нагреве, также наблюдается экзотермический пик площадью 20,3 Дж/г,

что свидетельствует о низкой степени отверждения связующего. Термообработка по режиму 60 °С 12 часов + 80° С 48 часов более эффективна, чем термообработка по режиму 70 °С 30 часов, поскольку разница между температурами стеклования при первом и втором нагревах составляет 3 °С.

В процессе выполнения работ по отработке в заводских условиях АО «СНСЗ» вакуумной технологии изготовления образцов и конструкций на основе смолы марки Dion FR 9300 нами совместно с АО «СНСЗ» для уменьшения пенообразования в связующем при введении отверждающих компонентов предложено использование инициатора Peroxide № 24 (гидроперекись кумола) вместо инициатора Peroxide № 11 (перекись метилэтилкетона). Ускоритель марки Norpol 9802P и инициатор Peroxide № 24 вводились в смолу в разном относительно рекомендованным производителем количестве, но при постоянном соотношении ускоритель/инициатор = 3/2. Для образцов термообработанных при температурах 60, 70, 80 °С характерен одинаковый вид термограмм с релаксационным пиком, при этом увеличение количества вводимых компонентов отверждающей системы на 10% не дает дополнительных преимуществ в процессе отверждения (разница в температурах стеклования по сравнению с образцами со стандартной отверждающей системой 0,5 °С).

Образцы связующего на основе отечественной винилэфирной смолы марки ВЭ-ФАС изготавливались с отверждающей системой, состоящей из ускорителя марки НК-2, инициатора марки гипериз, катализаторов марок МОК (марганец (III) ацетилацетонат) и МОК-2. Термообработка осуществлялась по режиму 80 °С в течение 8 часов. Результаты исследования образцов связующего методом ДСК сведены в таблицу 3. Температура стеклования образцов без термообработки находится в интервале 52–67 °С. Для образца партии № 13 вариант 3 площадь экзотермического пика значительна по отношению к площадям других аналогичных экзотермических пиков и составляет 42,38 Дж/г. При повторном нагреве значения температур стеклования образцов находятся в интервале 99–113 °С, что соответствует температуре стеклования отвержденного связующего на основе смолы марки ВЭ-ФАС. Таким образом, термообработка по режиму 80 °С 8 часов является эффективной.

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования образцов связующего на основе смолы марки ВЭ-ФАС методом ДСК.

Номер партии	Отверждающая система	Режим термообработки	1ый нагрев		2ой нагрев
			Площадь экз. пика, Дж/г	Температура стеклования, °С	Температура стеклования, °С
Партия № 10	ОК-1 – 5 ГПК – 4 МОК-1 – 2	Без т/о	9,91	58,4	104,8
		80 °С 8 часов	8,12	67,3	99,8
Партия № 11		Без т/о	18,6+7,3	57,3	108,3
		80 °С 8 часов	–	–	–
Партия № 12		Без т/о	13,29	67,9	113,4
		80 °С 8 часов	9,77	112,2	113,3
Партия № 13 вариант 2	ОК-1 – 5 ГПК – 4 МОК-1 – 2 МОК-2 – 0,01	Без т/о	8,06	60,2	103,3
		80 °С 8 часов	7,99	91,2	105,9
Партия № 13 вариант 3	ОК-1 – 5 ГПК – 4 МОК-1 – 2 МОК-2 – 0,01	Без т/о	42,38	67,3	107,4
		80 °С 8 часов	4,51	99,3	108,6

С учетом полученных результатов для необитаемых конструкций и стабилизации физико-механических характеристик ПКМ на основе исследованных марок винилэфирных смол необходимо проведение термообработки при температуре не менее 80 °С, что соответствует технологическим возможностям заводов, имеющих «композитное» производство.

**Четвертая глава** посвящена исследованию физико-механических свойств ПКМ и ГПКМ на основе армирующих материалов различной химической природы: стекло-, угле- и органотканей. Для вырезки образцов методом вакуумной инфузии изготавливались пластины размерами 1000x1000x10 мм. Уровень вакуума при изготовлении материалов методом вакуумной инфузии – 5-10 кПа. Режим термообработки – 80 °С 8 часов.

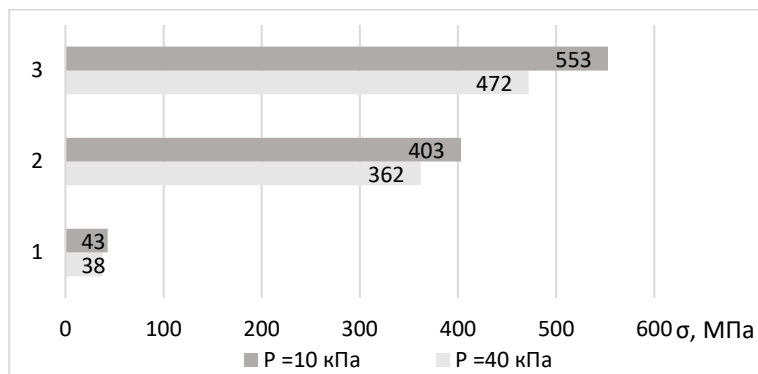
Выполнена сравнительная оценка (таблица 4) физико-механических свойств стеклопластиков, изготовленных методами контактного формования и вакуумной инфузии на основе смолы марки Dion FR 9300, стеклоткани марки 9677R3-290 (структура [0°/90°] с поверхностной плотностью 290 г/м<sup>2</sup>) и ее комбинации со стеклотканью марки 62031 (структура [±45°] с поверхностной плотностью 483 г/м<sup>2</sup>), допущенных к применению при изготовлении корпусных конструкций тральщика пр.12700 методом контактного формования. Установлено, что применение метода вакуумной инфузии для изготовления ПКМ приводит к увеличению объемного соотношения «стекло/смола» на 10-13 % и, как следствие, к увеличению плотности

материала, что обеспечивает повышение жесткости на 15-30 %, прочности при сжатии на 12-25 %, при растяжении – до 45 %.

Т а б л и ц а 4. Физико-механические свойства стеклопластиков, изготовленных методом контактного формования и методом вакуумной инфузии

№ п/п	Характеристика	Направление, град	Метод контактного формования		Метод вакуумной инфузии	
			9677R3-290	9677R3-290 +62031	9677R3-290	9677R3-290 +62031
1	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	—	1720	1670	1920	1880
2	Относительное содержание связующего, %	—	42	47	32	35
3	Модуль упругости, ГПа	0 <sup>0</sup> / 90 <sup>0</sup>	19 / 19	18 / 17	25 / 26	24 / 24
4	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	0 <sup>0</sup> / 90 <sup>0</sup>	393 / 384	236 / 280	430 / 421	403 / 400
5	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	0 <sup>0</sup> / 90 <sup>0</sup>	395 / 410	312 / 296	471 / 455	392 / 365
6	Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	0 <sup>0</sup> / 90 <sup>0</sup>	58 / 51	47 / 49	51 / 48	50 / 49

Для оценки влияния величины уровня вакуума на физико-механические свойства стеклопластика на основе смолы марки Dion FR 9300 и стеклоткани марки 9677R3-290 испытаны образцы, вырезанные из пластин, изготовленных с разницей в уровне вакуума при формовании 30 кПа. Такое изменение уровня вакуума приводит к увеличению плотности на 7 % (с 1790 до 1920 кг/м<sup>3</sup>) и увеличению прочности при сжатии на 11 %, прочности при изгибе на 17 % (рисунок 1). Таким образом, изменение уровня вакуума при изготовлении ПКМ позволяет регулировать значения прочностных свойств.



Р и с у н о к 1 – Прочностные характеристики стеклопластика в зависимости от уровня вакуума при изготовлении. 1 – Прочность при межслойном сдвиге, 2 – Прочность при сжатии, 3 – Прочность при изгибе.

64009; марки См-42019 взамен импортной стеклоткани марки 42031; марки См-42020 взамен импортной стеклоткани марки 62031; марки Ст-62004 взамен

В рамках ОКР «Аксиал» АО «Препрег-СКМ» изготовлены отечественные стеклоткани, которые являются аналогами импортных стеклотканей фирмы Ahlstrom, используемых при изготовлении корпусных конструкций тральщика пр. 12700: марки См-44009 взамен импортной стеклоткани марки

импортной стеклоткани марки 9677R3-290. Нами установлено, что применение отечественных стеклотканей позволяет повысить значения жесткости стеклопластика на 5-11 %, разрушающего напряжения при растяжении на 10-20 %, при межслойном сдвиге на 5-7 %, при сжатии на 5-25 % по сравнению со стеклопластиками на основе импортных смол, что позволяет успешно применять отечественные стеклоткани при изготовлении крупногабаритных судовых корпусных конструкций. Стеклопластику на основе стеклоткани марки См-42019 и смолы марки Dion FR 9300 присвоена марка СВИ-9300. Трехслойному материалу с несущими слоями из стеклопластика марки СВИ-9300 и средним слоем из пенопласта марки Divinycell H35 присвоена марка ТКИ-9300.

Для проведения исследований углепластиков нами выбраны отечественные углеродные армирующие материалы производства АО «Препрег-СКМ», разработанные в рамках выполнения ОКР «Аксиал»: марок Ст-11043 (однонаправленной структурой [0°/-] с поверхностной плотностью 230 г/м<sup>2</sup>), См-42101 (структура [±45°] с поверхностной плотностью 420 г/м<sup>2</sup>), Ст-12026 (структура [0°/90°] с поверхностной плотностью 270 г/м<sup>2</sup>). Результаты физико-механических испытаний углепластиков на основе смолы марки Dion FR 9300 приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5. Физико-механические свойства углепластиков на основе отечественных углетканей и смолы марки Dion FR 9300, изготовленных методом вакуумной инфузии.

№ п/п	Характеристика	Направление, град	Значение характеристики для углепластика на основе ткани марки		
			Ст-11043	См-42101	Ст-12026
1	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	—	1470	1500	1520
2	Модуль упругости, ГПа	0°	96,1	—	59,2
		45°	—	55,2	—
3	Модуль межслойного сдвига ГПа	0°	4,7	—	3,8
		45°	—	3,4	—
4	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	0°	1376	—	856
		45°	—	720	—
5	Предельное относительное удлинение при растяжении, %	0°	1,24	—	1,28
		45°	—	1,20	—
6	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	0°	351	—	351
		45°	—	382	—
7	Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	0°	43	—	41
		45°	—	41,5	—
8	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	0°	524	—	688
		45°	—	621	—

Углепластик на основе однонаправленной углеткани марки Ст-11043 характеризуется наибольшей жесткостью ( $E=96$  ГПа) и прочностью при растяжении (1376 МПа). Значения разрушающего напряжения при межслойном сдвиге для углепластиков на основе всех трех тканей практически одинаковые – 41-43 МПа.

Для изготовления органопластика методом вакуумной инфузии выбраны эпоксидное связующее марки ЭКМ-70Т и органоткань арт. 12036 (структурой  $[0^\circ/90^\circ]$  с поверхностной плотностью 145 г/м<sup>2</sup>). Изготовлены пластины размерами 1500x1000x10 мм. В таблице 6 представлены результаты испытаний эпоксидного органопластика параллельной структуры армирования в исходном состоянии. Разработанному органопластику присвоена марка РОП.

Т а б л и ц а 6. Физико-механические свойства эпоксидного органопластика марки РОП параллельной структуры армирования.

№ п/п	Характеристика	Направление, град	Значение характеристики
1	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	—	1140
2	Содержание связующего, %	—	61
3	Модуль упругости, ГПа	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	18 / 5,8 / 19
4	Модуль сдвига в плоскости армирования, ГПа	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	1,6 / 9,2 / 1,7
5	Модуль межслойного сдвига ГПа	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	1,7 / 1,5 / 1,8
6	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	438 / 214 / 538
7	Статический модуль упругости при растяжении, ГПа	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	19,8 / 9,6 / 20,4
8	Относительное удлинение при растяжении, %	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	2,7 / 4,5 / 2,9
9	Коэффициент Пуассона	$0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$	0,09 / 0,42 / 0,09
10	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	$0^\circ / 90^\circ$	152 / 156
11	Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	$0^\circ$	36
12	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	$0^\circ / 90^\circ$	323 / 330

Значения прочностных и упругих характеристик углепластиков превышают аналогичные значения для стеклопластиков при меньшей на 25 % плотности, однако прочность при межслойном сдвиге углепластиков находится на уровне прочности стеклопластика, что говорит о недостаточной адгезии на границе раздела «волокно-смола». Основным недостатком углепластиков на сегодняшний день является более низкое предельное удлинение при растяжении, что ограничивает спектр конструкций, где потенциально возможно применение чистого углепластика. Органопластик обладает упругими и прочностными характеристиками сравнимыми с



характеристиками стеклопластика (за исключением прочности при сжатии и межслойном сдвиге), а основным преимуществом органопластиков является низкая плотность, поэтому применение органопластиков целесообразно в составе ГПКМ.

Изготовлены и испытаны ГПКМ (структура  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ ) на основе стеклоткани марки См-42005, органоткани марки См-42004, углеткани марки Ст-12026 и квадроаксиальной стеклоуглеткани марки См-44007 – стеклоорганопластик См-42005/См-42004; стеклоуглепластик Ст-12026/62031; стеклоуглепластик См-44007. Применение гибридных структур при изготовлении композитных конструкций позволяет при сохранении высокой жесткости материала на уровне 40-50 ГПа обеспечить высокие прочностные характеристики при растяжении на уровне 700-800 МПа и снижения плотности материала вплоть до  $1500 \text{ кг/м}^3$ . Кроме того, совместное использование углеткани (органоткани) и стеклоткани позволит повысить проницаемость всего пакета армирующего материала при пропитке его связующим методом вакуумной инфузии за счет более высокого коэффициента проницаемости стеклоткани, что повышает технологичность изготовления и качество изготавливаемой конструкции.

**В пятой главе** представлены результаты определения технологических свойств связующих и армирующих материалов, а также разработки процесса изготовления конструкций методом вакуумной инфузии с использованием различных схем пропитки, поскольку важнейшей задачей при использовании метода вакуумной инфузии является прогнозирование течения фронта связующего.

Течение связующего в плоскости армирующего материала ограниченных размеров подчиняется закону фильтрации жидкостей и газов в пористой среде (закон Дарси, 1856 г.):

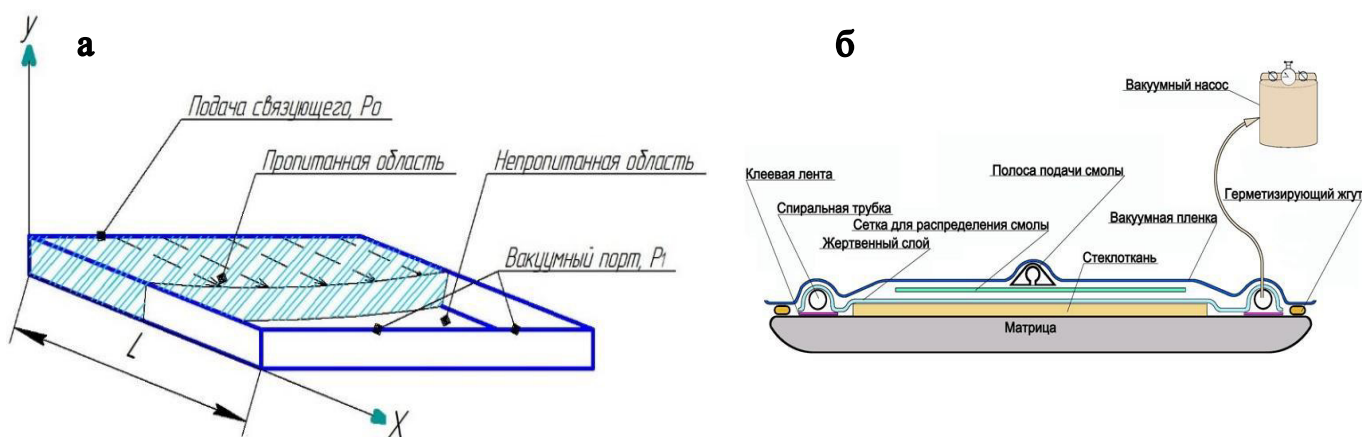
$$v = -K \cdot I = K \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dL} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость течения, м/с;  $K$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;  $I$  – градиент напора;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $dP/dL$  – градиент давления на участке течения длиной  $L$ .

Пакет армирующего материала является анизотропной средой, а учитывая, что фронт связующего распространяется в плоскости армирующего материала, то с учетом пористости армирующего материала  $\epsilon$  и неразрывности

потока закон Дарси позволяет определить зависимость количества жидкости  $Q$  с динамической вязкостью  $\eta$ , прошедшей через объем материала с поперечным сечением  $S$  и длиной  $L$  под действием разницы давления  $\Delta P$  (показания вакуумметра, что соответствует разнице между атмосферным и остаточным давлениями) (рисунок 2) :

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot S}{(1 - V_f) \cdot \eta \cdot L}, \quad (2)$$



Р и с у н о к 2. Иллюстрация пропитки армирующего материала (а) и схема организации пропитки.

Движущей силой процесса пропитки является разность между остаточным давлением, создаваемым вакуумным насосом и атмосферным давлением.

Интегрирование закона Дарси в плоскости оси  $X$  (течения связующего) позволяет получить время  $t$ , необходимое для пропитки связующим участка длиной  $L$ :

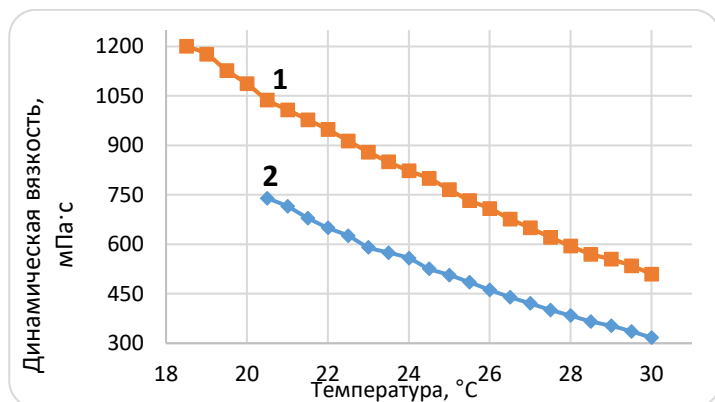
$$t = \frac{(1 - V_f) \cdot \eta \cdot L^2}{2K \cdot \Delta P}, \quad (3)$$

Соответственно выражение для определения коэффициента проницаемости армирующего материала записывается в следующем виде:

$$K = \frac{(1 - V_f) \cdot \eta}{\Delta P} \cdot \frac{L^2}{t} \quad (4)$$

Динамическая вязкость смолы оказывает значительное влияние не только на время пропитки, но и на качество пропитки армирующего материала, так как при высокой динамической вязкости затрудняется пропитка армирующего материала, а при низкой – возможно вытекание связующего и некачественная пропитка конструкции, а ее значение возрастает с увеличением температуры в соответствии уравнением Аррениуса. В лабораторных условиях ЦНИИ КМ «Прометей»

определена динамическая вязкость винилэфирных смол марок Dion FR 9300, Derakane Momentum 510C-350 в зависимости от температуры (рисунок 3).



Р и с у н о к 3 – Зависимость динамической вязкости винилэфирных смол от температуры. 1 – Смола марки Derakane Momentum510C-350; 2 – Смола марки Dion FR 9300.

Изменение температуры на 4 °C приводит к изменению динамической вязкости на 200 мПа·с, а поскольку время пропитки прямо пропорционально динамической вязкости смолы, то при изготовлении крупногабаритных конструкций из ПКМ необходимо не допускать ее колебаний.

Исследуемые винилэфирные смолы при стандартной отверждающей системе, рекомендованной производителями, имеют время гелеобразования от 15 до 60 мин, что недостаточно для изготовления крупногабаритных конструкций. Регулирование времени гелеобразования осуществляется с использованием ингибиторов, замедляющих процесс полимеризации. В таблице 7 приведены значения времени гелеобразования связующего на основе смолы марки Dion FR 9300 в зависимости от содержания ингибитора марки Norpol 9854, применение которого позволяет получить требуемое время гелеобразования при изготовлении крупногабаритной конструкции из ПКМ.

Т а б л и ц а 7. Влияние ингибитора марки Norpol 9854 на время гелеобразования связующего на основе смолы марки Dion FR 9300

Содержание ингибитора, %	Время гелеобразования связующего, мин
0,025	45
0,050	55
0,100	90
0,150	172
0,200	280

В рамках выполнения ОКР «Аксиал» положено начало разработке отечественной винилэфирной смолы аналога импортной смолы марки Dion FR 9300, но содержащей фосфор в связанном виде в составе олигоэфиракрилатной основы или введенный при синтезе в её состав фосакрилат. При проведении

экспериментальных исследований по отработке технологии отверждения отечественная винилэфирная смола в присутствии стандартной двухкомпонентной системы «гипериз-нафтенат кобальта» не отверждалась в течение 10 суток. Совместно с ООО «Волгоградпромпроект» установлено, что это связано с ингибирующим действием антипирена – фосфорсодержащего мономера в составе смолы. Для снижения ингибирующего действия фосакрилата проведены совместные исследования по подбору дополнительных эффективных компонентов иницирующей системы, результатом которых стало применение соускорителя хелатного типа МОК (марганец (III) ацетилацетоната) совместно с металлоорганическим катализатором МОК-2, позволяющим регулировать время гелеобразования связующего (таблица 8).

Т а б л и ц а 8. Влияние соускорителей на время гелеобразования связующего на основе смолы марки ВЭ-ФАС.

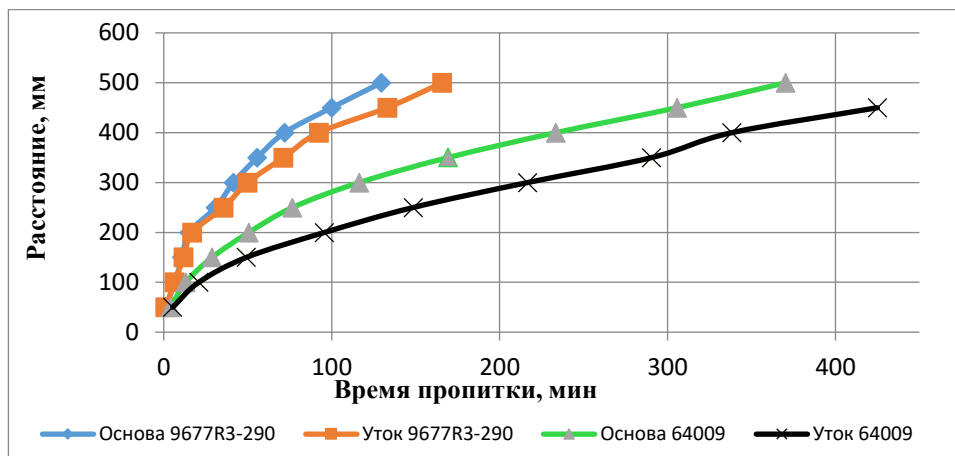
№ п/п	№ партии	Компоненты системы отверждения, масс.ч. на 100 масс.ч. смолы				Время гелеобразования, мин
		НК-2	Гипериз	МОК	МОК-2	
1	10	5	4	2	-	420
2	11	5	4	2	0,01	200
3	12	5	4	2	0,02	130
4	13	5	4	2	0,03	75
5	14	5	4	2	0,05	35

Армирующий материал определяет не только конечные прочностные свойства ПКМ, но и влияет на технологичность изготовления конструкции. Так, толщина стеклоткани марки 64009 составляет 1,2 мм, что почти в 4,3 раза больше толщины стеклоткани марки 9677R3-290, поэтому и процессы пропитки данных стеклотканей при прочих равных условиях существенно различаются.

Для определения коэффициентов проницаемости указанных выше армирующих материалов на двух слоях армирующего материала при динамической вязкости смолы марки Dion FR 9300 0,65 Па·с и уровне вакуума 10 кПа (рисунок 4) качественно определены скорости пропитки, физический смысл которых заключается в пройденном фронтом связующего расстоянии за единицу времени:

$$t_{\text{пропитки}} = \frac{\sum_i l_i^2 (t_i - t_{\text{ср}})}{\sum_i (t_i - t_{\text{ср}})^2}, \quad (5)$$

где  $l_i$  – расстояние, прошедшее связующим за время  $t_i$ , м;  $t_{\text{ср}}$  – среднее время за  $i$  измерений, с.



Р и с у н о к 4. Результаты определения скорости пропитки стеклотканей марок 9677R3-290 и 64009.

Для пропитки стеклоткани марки 64009 требуется значительно больше времени, например, для прохождения фронта связующего на отметке 500 мм – в 3 раза больше, что при использовании одинаковых схем пропитки в методе вакуумной инфузии приведет к непропитке конструкции. Подобным образом определены скорости пропитки различных исследуемых отечественных и импортных армирующих материалов, и в соответствии с формулой (4) вычислены коэффициенты проницаемости (таблица 9).

Выполнены расчеты времени пропитки пластин по обычной и секторной схемам пропитки (рисунки 2 и 5) при следующих исходных данных: длина 1000 мм, ширина 1000 мм, толщина 10 мм, температура 23 °С, динамическая вязкость смолы марки Dion FR 9300 0,65 Па·с, уровень вакуума 10 кПа, объемное содержание армирующего материала 0,5.

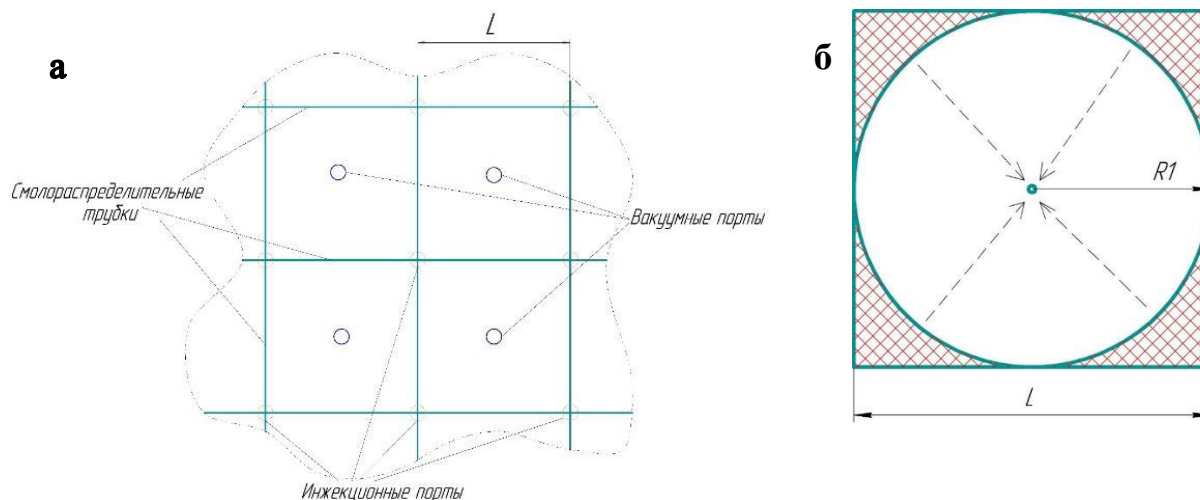
Т а б л и ц а 9. Время пропитки пластин ПКМ на основе армирующих материалов различных марок в зависимости от типа применяемой схемы пропитки.

№ п/п	Марка материала	Тип	Коэффициент проницаемости, $\times 10^{11} \text{ м}^2$	Время пропитки по обычной схеме, мин	Время пропитки по секторной схеме, мин
1	9677 R3-290	Стеклоткани	2,3/2,2	1308/1367	551/576
2	62031		2,9*	1037*	437*
3	64009		2,0/1,2	1504/2507	634/1056
4	42031		4,1/7,2	733/417	309/176
5	СМ-44001		2,8/1,8	1075/1671	453/704
6	СМ-44003		3,0/2,1	1003/1433	422/603
7	СМ-44004		1,9/-	1584/-	667/-
8	СМ-44005		2,1/1,1	1433/2735	603/1152
9	СМ-44006		1,6/1,5	1881/2006	792/845
10	СМ-44002		2,8/1,0	1075/3009	452/1267
11	СМ-42001		3,5/2,7*	860/1114	362/469
12	СМ-42002		1,2/9,5*	2507/317	1056/133
13	СМ-42003		1,0/8,0*	3009/376	452/158
14	СМ-42005		7,7/2,5	391/1204	164/507
15	СМ-42006		7,5/2,5	401/1204	169/507
16	СМ-42008		4,1/3,8	734/792	309/333
17	СМ-43001		8,0/4,8	376/627	158/264
18	СМ-42007		10,0/6,3	301/478	126/201
19	Ст-12026	Углеткань	0,35/-	8597/-	3622/-
20	СМ-42004	Органоткань	0,8/-	3761/-	1584/-
21	СМ-44007	Гибрид (стекло-/углеткань)	2,9/-	1037/-	437/-

Примечание: в числителе дроби указано значение параметра по основе, в знаменателе – по утку; \* значение, измеренное под углом 45° к кромке стеклоткани

Углеткань марки Ст-12026 и органоткань марки СМ-42004 имеют коэффициент проницаемости на порядок меньше, чем стеклоткани, поэтому для их пропитки потребуется значительно больше времени. Выполненные расчеты показывают, что время пропитки ПКМ по секторной схеме в среднем 2,4 раза меньше, чем по обычной схеме. Также по результатам расчетов получено, что время пропитки стеклотканей превышает время гелеобразования связующего в 2 – 10 раз, а для углеткани марки Ст-12026 – в 43 раза. Поэтому для изготовления пластин и опытных конструкций из стеклопластика на АО «СНСЗ» использована смолопроводящая сетка марки GreenFlow75 с коэффициентом проницаемости  $4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ , что увеличило значение коэффициента проницаемости до  $10^{-10} \text{ м}^2$  и существенно улучшило пропитку армирующих материалов: время пропитки составило 25-81 мин, а полученные значения максимальной длины 1500-2800 мм пропитки позволяют использовать такие комбинации для изготовления крупногабаритных конструкций методом вакуумной инфузии с различными схемами пропитки.

Совместно с АО «СНСЗ» для изготовления палуб, обшивок, фрагментов надстроек применена секторная схема с элементом сетки, представленными на рисунке 5.



Р и с у н о к 5. Секторная схема для пропитки крупногабаритных конструкций (а) и элемент сетки (б).

Поверхность конструкции разбивается на сектора, которые представляют квадрат со стороной от 1000 до 2000 мм. В центре каждого сектора располагают вакуумный порт, инжекционные порты подачи связующего располагаются в узлах областей, таким образом, чтобы на один порт приходилось по 4-6 областей. Пропитка начинается со сторон сектора в направлении центра, что позволяет максимально быстро пропитать площадь, ограниченную сторонами квадрата и применительно к пропитке окружностей закон Дарси имеет следующий вид:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot \Delta P \cdot h}{(1 - V_f) \eta \cdot \ln(R/r)}, \quad (6)$$

где R – эквивалентный радиус окружности, м; r – радиус трубки вакуумного порта, м.

Время пропитки определяется выражением:

$$t = \frac{(1 - V_f) \eta \cdot (R^2 - r^2)}{2K \cdot \Delta P} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{(1 - V_f) \cdot \pi \cdot h}{Q} \quad (7)$$

Выполнены расчеты времени пропитки натуральных крупногабаритных конструкций – секции палубы и фрагмента обшивки корпуса тральщика пр.12700 методом вакуумной инфузии, при этом использованы следующие исходные данные: динамическая вязкость смолы марки Dion FR 9300 –

0,45 Па·с; объемное содержание армирующего материала – 0,5; коэффициент проницаемости армирующего материала палубы  $k=2,9 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>; коэффициент проницаемости пакета армирующих материалов обшивки корпуса  $k=5,0 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>; толщина материала палубы – 13 мм, толщина обшивки корпуса – 27 мм; уровень вакуума – 10 кПа; ограничение по времени пропитки – не более 280 мин; длина стороны L: для палубы 1500 мм, для обшивки корпуса 2000 мм.

Расчетное время пропитки секции палубы по секторной схеме, рассчитанное по формуле (7), составляет 74,8 мин. Проведенные расчеты при пропитке по обычной схеме с двумя вариантами значения динамической вязкости смолы 0,45 Па·с и 0,65 Па·с показали, что значения времени пропитки составляют 415,1 и 287,4 мин соответственно, что не приемлемо при изготовлении подобных крупногабаритных конструкций.

При расчете времени пропитки фрагмента обшивки корпуса учтено, что различные сектора пропитки находятся под разными углами к основной плоскости (ОП) корабля. Таким образом давление уменьшается и изменение давления определяется по формуле  $\Delta P_{\text{изм}} = \Delta P - \rho g H$  (8)

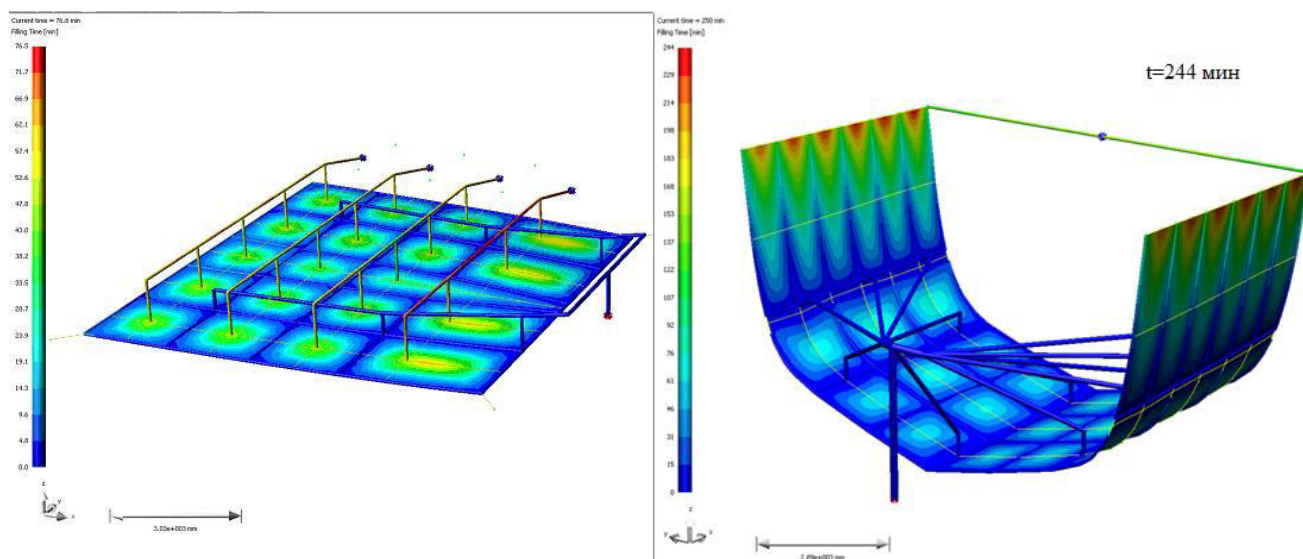
где  $\Delta P$  – разница давлений (показания вакуумметра), Па;  $\rho$  – плотность смолы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $H$  – высота пропитки, м.

Совместно с АО «СНСЗ» применено две схемы пропитки – секторная схема для днищевой области и обычная схема для бортов. Расчетное время пропитки по формулам (3) и (7) с учетом (8) составляет для днищевой области 87 мин и для бортов 240 мин соответственно. Пропитка бортов целесообразна только по обычной схеме пропитки, поскольку при использовании секторной схемы существует риск стекания связующего и непропитка по толщине пакета армирующего материала со стороны оснастки. При динамической вязкости смолы 0,65 Па·с пропитка на отметке 2000 мм не произойдет по причине превышения времени гелеобразования связующего (необходимое время для пропитки 323 мин).

На рисунке 6 представлен результат моделирования пропитки в программном продукте PolyWorx<sup>TM</sup> (ООО «Композит-Проф»), время пропитки секции палубы – 75,5 мин, что совпадает с проведенными расчетами; время пропитки фрагмента



обшивки корпуса – 244 мин, что на 4 минуты больше рассчитанного и связано с заполнением связующим смолоподающих трубок.



Р и с у н о к 6 – Результат моделирования пропитки секции палубы и фрагмента обшивки корпуса в соответствии с принятой схемой пропитки методом вакуумной инфузии.

## Выводы

1. Разработаны новые ПКМ и ГПКМ на основе отечественных армирующих материалов, винилэфирной и эпоксидной смол, удовлетворяющие комплексу требований, предъявляемых к композитным материалам в судостроении и кораблестроении для изготовления большинства судовых и корабельных корпусных конструкций: обшивок корпусов и обтекателей, палуб, переборок, надстроек.

2. Определены физико-механические характеристики новых ПКМ и ГПКМ, изготовленных методами вакуумной инфузии и контактным формованием на основе отечественных армирующих материалов различной химической природы, винилэфирной и эпоксидной смол.

3. Установлено, что использование метода вакуумной инфузии при изготовлении ПКМ позволяет не только повысить уровень физико-механических свойств материала, но и регулировать их значения.

4. Совместно с АО «СНСЗ» предложен технологический процесс с использованием обычной и секторной схем пропитки для изготовления крупногабаритных конструкций из ПКМ и ГПКМ судов и кораблей водоизмещением до 1000 тонн методом вакуумной инфузии за один цикл.

5. Разработан алгоритм расчета времени процесса пропитки ПКМ, учитывающий технологические характеристики используемых связующих и армирующих материалов; выполнены расчеты времени пропитки типовых корпусных конструкций - элемента секции палубы и фрагмента обшивки корпуса тральщика пр.12700.

6. Разработана экспресс-метод определения режимов термообработки ПКМ и крупногабаритных судовых корпусных конструкций на основании значений температуры стеклования связующего. Показано, что количественный состав отверждающей системы не оказывает существенного влияния на температуру стеклования связующего в отличие от значения температуры термообработки.

7. На разработанные материалы и технологические процессы выпущена вся необходимая техническая и технологическая документация (комплекты технических условий и руководящих документов, монтажная инструкция). Материалы марок ТКИ-9300, СВИ-9300, РОП решениями МВК и заключениями НИИ КиВ ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» допущены к применению на заказах ВМФ.

Метод вакуумной инфузии успешно применяется на АО «СНСЗ», а разработанные новые ПКМ внедрены при строительстве заказов пр.12700, 20386 и 23380, и рекомендованы к применению в производственных условиях ЗАО «Пелла-Фиорд», ПАО «АСЗ».

### **Основные результаты диссертационной работы отражены в научных трудах**

1. Горев, Ю.А. Оценка степени отверждения полимерного связующего при изготовлении композиционных материалов методом дифференциально-сканирующей калориметрии / Ю.А. Горев, В.С. Трясунов // Композитный мир. – 2010. – №5. – С. 40-43.

2. Середохо, В.А. Проблемы выбора полимерного связующего для изготовления крупногабаритных конструкций из композита методом инфузии / В.А. Середохо, Ю.А. Горев, В.С. Трясунов // Сборник «ВОКОР-2011». – 2012. – С. 158-163.

3. Трясунов, В.С. Расчет технологических параметров вакуумного метода изготовления крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных

материалов / В.С. Трясунов, Ю.А. Горев // Труды 11 конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей». – 2013. – С. 61-67.

4. Анисимов, А.В. Эпоксивинилэфирное связующее для огнестойких стеклопластиков судостроительного назначения / А.В. Анисимов, В.С. Трясунов, Е.Л. Шульцева, Ф.В. Мудрый, Ю.В. Соколов. // **Вопросы материаловедения**. – № 4 (92). – 2017 г. – С. 120-128.

5. Орыщенко, А.С. Неметаллические материалы и защита от коррозии / Орыщенко А.С., Анисимов А.В., Кузьмин Ю.Л., Бахарева В.Е., Серый П.В. и др. // Освоение морских глубин. Сборник статей. – М.: Издат. дом «Оружие и технологии». – 2018. – С.242-248.

6. Трясунов, В.С. Органопластик для судовых корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов, эксплуатирующихся в морской среде / В.С. Трясунов, М.С. Галктионов, Е.Л. Шульцева, А.М. Баганик // **Вопросы материаловедения**. – № 2 (94). – 2018 г. – С. 155-160.

7. Горев, Ю.А. Расчет технологических параметров вакуумного метода изготовления крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов. Тезисы доклада / Ю.А. Горев, В.С. Трясунов // Сборник тезисов докладов 11 ежегодной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» 20-22 июня 2012 г. – 2012 – С. 50-51.

8. **Патент RU2549877** «Связующее на основе эпоксивинилэфирной смолы и огнестойкий полимерный композиционный материал на его основе»; В.С. Трясунов, Ф.В. Мудрый, Т.А. Аникина, В.В. Пешков, Е.Л. Шульцева, Ю.В. Соколов, Бюл. № 13, 10.05.2015 г.

9. **Патент RU2573003** «Эпоксивинилэфирная смола огнестойкий полимерный композиционный материал на ее основе» Т.А. Аникина, Ф.В. Мудрый, Ю.В. Соколов, В.В. Пешков, Е.Л. Шульцева, В.С. Трясунов, Бюл. № 16, 20.01.2016 г.