

УДК 629.12

EDN CNWWGR

**А.В. Павлов<sup>1,2</sup>, С.Н. Хрунков<sup>1</sup>, Д.Н. Варсеев<sup>1</sup>, Д.А. Двинин<sup>1</sup>**  
**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА**  
**И БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ**  
**МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

<sup>2</sup>Группа компаний «ИНФАРС»  
*Москва, Россия*

Представлены результаты оценки возможности импортозамещения производства двигателей для маломерных судов, а также интеграция технологий их обратного инжиниринга и быстрого прототипирования. Рассмотрены вопросы реверс-инжиниринга процесса деконструкции изделия для понимания его конструкции и функциональности в сочетании с быстрым прототипированием методом быстрого изготовления масштабной модели с помощью 3D-печати и других технологий аддитивного производства.

**Ключевые слова:** 3D-сканирование, фотограмметрия, облако точек, 3D-моделирование, САПР, двигатели судов, КОМПАС-3D, CloudCompare.

Согласно статье 7 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 № 81-ФЗ в актуальной редакции, маломерным считается судно, длина которого не должна превышать 20 м и общее количество людей на котором не должно превышать 12.

Спектр задач, для решения которых актуально использование маломерных судов, весьма обширен. Укрупненно можно выделить следующие направления деятельности:

- рыболовство;
- грузопассажирские перевозки;
- транспортировка грузов и выполнение обслуживающих работ;
- сейсморазведка;
- проведение научных исследований;
- осуществление лоцманских проводок судов;
- спорт и отдых на воде.

По данным маркетингового агентства *DISCOVERY Research Group*, в 2019 г. доля импортных судов достигала 40 % в категории от 7 до 17 м и 20 % среди маломерных лодок и катеров до 7 м. Таким образом, в условиях внешнего санкционного давления проявляются серьезные проблемы как со своевременным обслуживанием импортных маломерных судов, так и с приобретением ряда комплектующих для судовых энергетических установок в частности. Наиболее ярко данное наблюдение проявилось в секторе спортивных судов, где в качестве одной из ключевых проблем можно выделить трудности в приобретении импортных судовых двигателей для крейсерских яхт [1].

Судовой движитель – это специальное устройство для преобразования механической работы судовой энергетической установки в упорное давление, преодолевающее сопротивление и создающее поступательное движение судна. По принципу действия движители разделяют на активные, к которым относят паруса, непосредственно преобразующие энергию ветра в поступательное движение судна, и реактивные – все остальные, так как создаваемое ими упорное давление получается в результате реакции масс воды, отбрасываемой в сторону, противоположную движению судна. По характеру рабочей среды движители условно делятся на гидравлические, воздушные и газодометные. Также следует отметить, что наибольшее распространение в конструкции пропульсивного комплекса получил реактивный

тип движителей, в частности, гребные винты [2]. Без проведения своевременного технического обслуживания и замены комплектующих невозможна эксплуатация судна и обеспечение безопасности на воде. Также следует отметить, что осуществление своевременного обслуживания судовой энергетической установки продлевает ресурс составных частей судна и снижает негативное воздействие на окружающую среду. В условиях санкционного давления все затруднительнее становится поставка запасных частей и расходных материалов для маломерных судов. В значительной степени данная проблема возникла и у людей, занимающихся парусным спортом. В данной работе проведена оценка возможности импортозамещения движителей для маломерных судов с применением методики реверсивного инжиниринга, выделены ключевые проблемы в организации мелкосерийного производства гребных винтов, сделаны выводы об инвестиционной привлекательности данного производства.

Реверсивный инжиниринг – это процесс создания изделия и технической документации на основе анализа готового изделия. Данный процесс состоит из ряда этапов, часть из которых могут быть цикличны, в том числе сбор сведений об объекте, подготовка и оптимизация модели, сравнение ключевых характеристик оригинального изделия и его копии [3]. В результате экономической разведки был сделан вывод, что оптимизация издержек производства при использовании подхода реверсивного инжиниринга возможна при внедрении в технологический процесс аддитивных технологий. Применение в производстве современных полимерных материалов позволит сократить время производства, снизить массу и конечную стоимость изделия, но при этом не допустить ухудшения целевых характеристик.

Углубленный анализ бизнес-процессов ряда крупных производителей гребных винтов показал, что производство судовых движителей минимально должно включать в себя следующие подразделения: отдел проектирования CAD/CAM, модельный цех, литейное производство, цех механической обработки, оснащенный ЧПУ-станками, цех для конечной обработки, отдел контроля качества. Помимо этого, большинство компаний используют собственные технологии литья и сплавы. Таким образом, организация подобного производства в России потребует разработки собственных решений и высокого уровня инвестиций [4,5].

На основе анализа данного сегмента рынка, с учетом совокупности внутренних и внешних факторов, была выдвинута гипотеза, что применение методики реверсивного инжиниринга и последующего быстрого прототипирования изделия, позволит существенно снизить экономические издержки при производстве аналогов за счет высокой степени информатизации и автоматизации производства, а также использовании иных конструктивных материалов без потери в ресурсе разрабатываемого изделия [1].

Задача интеграции реверсивных технологий остается одной из актуальных задач современного машиностроительного производства и обусловлена необходимостью постоянного совершенствования производственных процессов в машиностроении, увеличения скорости и точности изготовления деталей, а также уменьшения времени и затрат на разработку новых продуктов. В исследовании будут представлены методы получения пространственных трехмерных данных, методы преобразования облака точек в поверхностную модель, методы создания поверхностной и твердотельной трехмерной модели, а также вопросы применения аддитивных технологий в машиностроении [6].

При традиционном подходе к процессу проектирования, созданию изделия всегда предшествует описание его структуры, позволяющее оценить его геометрические особенности, размерные соотношения и допуски. Для этой цели обычно используются классические чертежи. Однако в настоящее время описание конструкций все чаще имеет вид виртуальной САПР модели, полученной в результате цифрового 3D-картографирования реальных объектов при помощи технологии реверс-инжиниринга. Это имеет особое значение при проектировании в машиностроении, где геометрия нового целевого изделия основана на его первоначальных прототипах. В этой ситуации существенно важными становятся процессы оцифровки и обработки облаков точек, полученных в результате сканирования с последующим созданием моделей САПР. Оцифровка, выполняемая с помощью 3D-сканера, обеспечивает возможность широкого диапазона измерений с объемной точностью до  $\pm 0,05$  мм [7].

3D-сканирование применяется на первом этапе обратного проектирования для получения точных геометрических параметров объектов. 3D-сканирование подразумевает использование различных технологий для создания цифрового представления физической формы и характеристик поверхности объекта.

В 3D-сканировании обычно используется несколько методов, каждый из которых имеет свои преимущества и подходящие области применения:

- лазерное сканирование;
- сканирование структурированным светом;
- фотограмметрия;
- контактное сканирование.

Фотограмметрия универсальна и весьма экономически эффективна, поэтому подходит для больших объектов или сред. Однако она может быть менее точной, чем лазерное или структурированное световое сканирование для получения мелких деталей. Контактное сканирование может быть очень точным, но оно медленнее и может не подходить для хрупких или мягких объектов [8].

В работе использовались методы сканирования структурированным светом. Данные были получены с помощью 3D-сканера *Rangevision Spectrum*. Для достижения удовлетворительного результата была выполнена подготовка изделия – очистка деталей от налета и смазочных материалов. Затем проводилось лазерное сканирование всего узла в разобранном состоянии: ступицы, лопастей, крепежных изделий. Для повышения точности результатов сканирования дополнительно было совершено матирование бликующих частей объектов. Объекты сканирования приведены на рис. 1, а результаты сканирования – на рис. 2 [9].



**Рис. 1. Лопасть и ступица гребного винта маломерного судна**

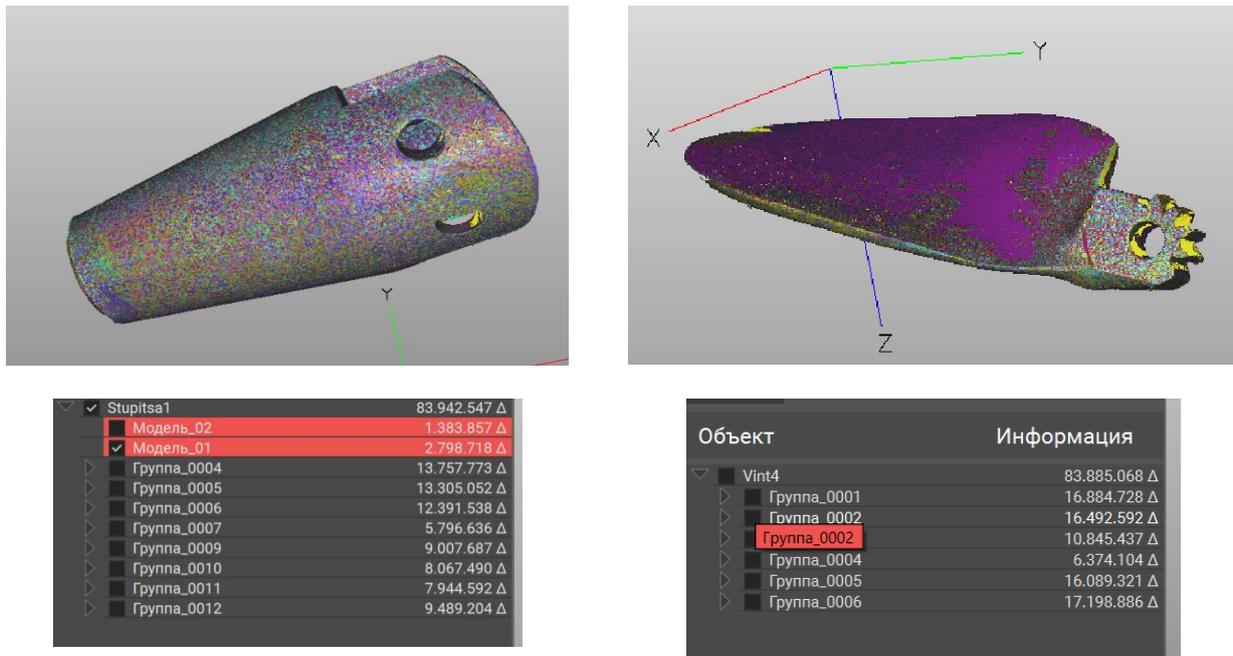


Рис. 2. Результаты сканирования

По рис. 2 видно, насколько избыточными являются полученные данные. Такая избыточность обусловлена попыткой захватить сложную геометрическую форму в случае лопасти винта и глубину отверстий в случае ступицы. Подготовка объектов к сканированию включала матирование бликующих и труднодоступных для световых лучей частей объектов, в частности – зубчатого колеса (входит в состав механизма изменения шага гребного винта на винтах регулируемого шага) (рис. 3.).



Рис. 3. Матированное зубчатое колесо лопасти гребного винта

Первая обработка полученных облаков точек и построение модели проводились в программе от производителей сканера – *ScanCenter NG*. Обработка заключалась в удалении шумов (удалении несвязанных фрагментов единой модели), отборе корректных сканов для построения модели, а также в сшивке сканов. Пример модели, построенной и оптимизированной в *ScanCenter NG (RV 3D Studio)*, приведен на рис. 4.



Модель до оптимизации  
(2 798 718 треугольников)

Модель после оптимизации  
(1 383 857 треугольников)

**Рис. 4. Модель *ScanCenter NG***

Было принято решение не использовать модель, построенную в ПО от сканера, так как она является поверхностной, а не твердотельной. Дальнейшая обработка производилась параллельно в программных продуктах КОМПАС-3D и *Geomagic Design X*.

Моделирование составных частей рассматриваемого сборного узла заключается в последовательной реализации нескольких этапов: импорт результатов сканирования, их интерпретация в полигональную сетку, преобразование полученной сетки в множество поверхностей, конвертация данных поверхностей в твердое тело, на основе которого формируется САД – модель с последующим наложением геометрических взаимосвязей.

Импорт результатов сканирования объектов осуществлялся в программное обеспечение (ПО) *Geomagic Design X*. Использование данного ПО позволяет инициировать построение полигональной сетки в соответствующем инструментарии. На данном этапе появляется возможность осуществить дополнительную обработку преобразуемых точек и исключить точки, не относящиеся к объему проектируемой детали.

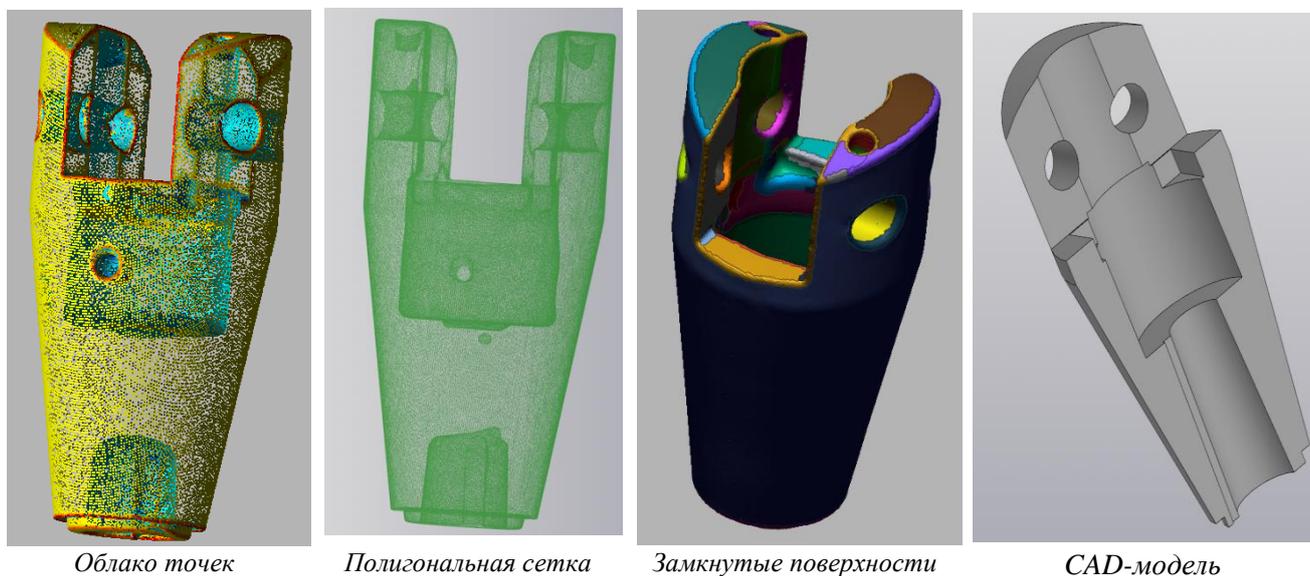
Полученная полигональная сетка доступна для редактирования, что позволяет вручную скорректировать очертания детали и нивелировать погрешности, допущенные на этапах сканирования и обработки результатов. Следует отметить, что редактирование осуществляется без использования объектных привязок, что, закономерно, снижает точность итогового результата. Учитывая данный факт, было принято решение осуществлять дальнейшее редактирование на базе полученной твердотельной модели в программном обеспечении, позволяющем выполнить данную операцию с достаточной точностью.

Использование инструментов точной обработки поверхности позволило получить множество поверхностей, геометрия которых основывается на полигональной сетке. Однако некоторые участки внутренней поверхности ступицы гребного винта не были просканированы, что стало причиной создания ряда вспомогательных геометрических элементов для замыкания полученного контура детали. Также вспомогательные плоскости и векторы были использованы для соотношения системы координат проектируемого изделия с системой координат САПР и корректировки углов поворота в пространстве. Данные действия позволяют осуществить корректный импорт полученных поверхностей в ПО КОМПАС-3D с сохранением положения и ориентации модели.

Конвертация данных поверхностей в твердое тело позволило приступить к заключительному этапу – трехмерному моделированию детали, созданию ее эскизов и наложению

геометрических зависимостей, что может быть использовано для дальнейшей параметризации модели под различные типоразмеры. Благодаря использованию функционала редактирования эскизов и элементов твердого тела, была получена трехмерная модель ступицы гребного винта, содержащую в себе эскизы, геометрические ограничения и линейные размеры, предоставляющие исчерпывающую информацию для дальнейшего получения рабочей конструкторской документации.

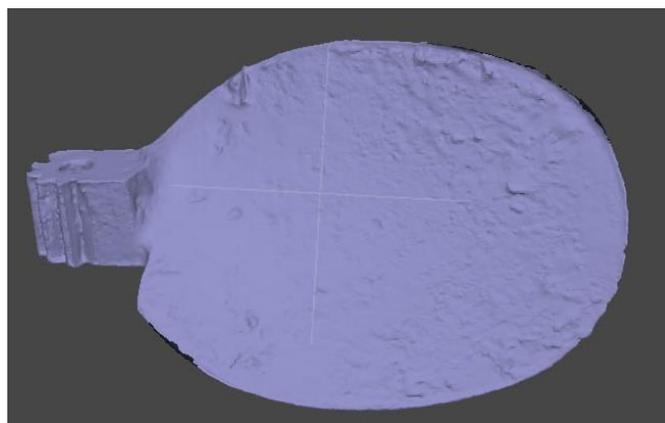
На рис. 5 приведены изображения промежуточных этапов трехмерного моделирования [8].



**Рис. 5. Процесс трехмерного моделирования**

Обработка лопасти винта стала более сложным процессом, чем обработка ступицы. На текущем этапе осуществляются мероприятия по интерпретации результатов использования фотограмметрии и лазерного сканирования лопасти гребного винта в целях подготовки модели всего сборного узла и сравнения модели с оригинальным изделием.

Для восстановления шага зубчатого колеса лопасти была также использована технология фотограмметрии, результат восстановления модели приведен на рис. 6.



**Рис. 6. Лопасть винта, восстановления с помощью технологии фотограмметрии**

Результаты, полученные с помощью технологии фотограмметрии, позволили очертить контур зубца, тогда как результаты лазерного сканирования (рис. 7) дали исчерпывающе точную информацию о контуре всей лопасти [10].

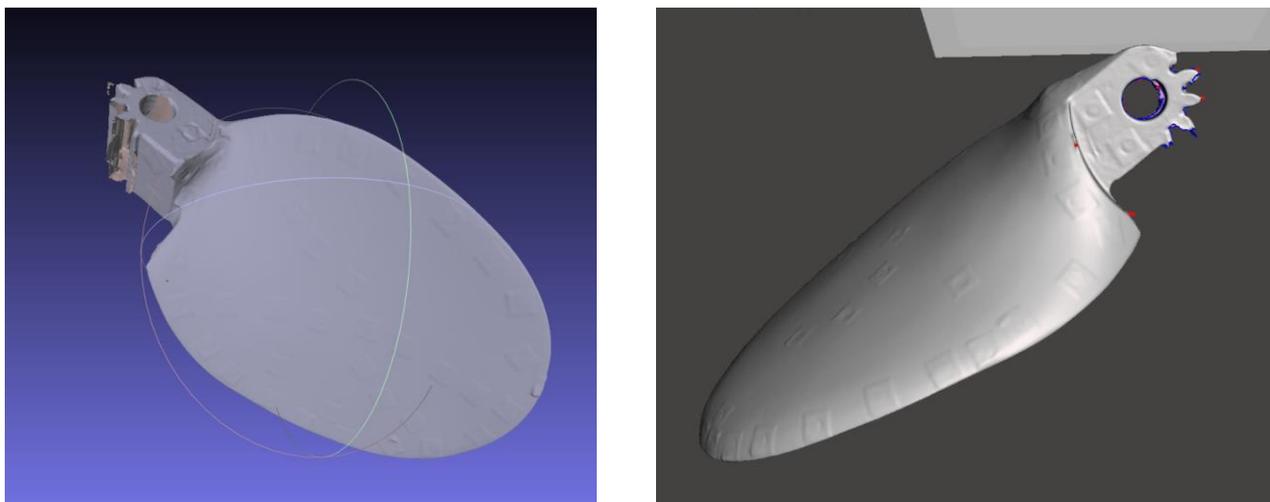


Рис. 7. Результаты сканирования лопасти винта

Использование двух различных методов обеспечивает избыточность информации, гарантируя компенсацию ошибок, если один из методов имеет ограничения. Данные, полученные обоими методами, можно объединить для создания 3D-моделей различных типоразмерных рядов изделий по каталогам производителей.

В дальнейшем проведем исследование материалов для печати первичной пробной модели на 3D-принтере.

В настоящее время для осуществления быстрого прототипирования изделия в машиностроении широко распространено применение FDM (*Fused Deposition Modeling*) и FFF (*Fused Filament Fabrication*) – принтеров, использующие в качестве расходного материала филаменты различного состава.

В качестве одного из способов классификации применяемых филаментов возможно их подразделение на однокомпонентные и многокомпонентные полимеры. Ниже приведено сравнение наиболее распространенных в использовании однокомпонентных материалов для трехмерной печати. Стоит отметить, что химический состав, механические свойства и прочие характеристики существенно зависят от производителя и условий прототипирования.

В табл. 1 и 2 приведено сравнение эксплуатационных и механических характеристик однокомпонентных филаментов, распространенных в технической печати.

По результатам проведенного анализа можно предположить, что для осуществления быстрого прототипирования гребных винтов, являющихся частью пропульсивного комплекса маломерных спортивных судов, следует использовать филаменты на основе PETG – пластика и PC, однако данные сведения нуждаются в проверке на практике.

**Таблица 1.**  
**Сравнение эксплуатационных характеристик 1-компонентных филоментов**

№	Обозначение, наименование	t экспл., °C	t печ., °C	Химическая обработка	Сфера применения	Примечания
1	PLA, полилактид	-20... +50	210 сопло 60 стол	Дихлорметан	Универсален	Пригоден любой адгезив. Непригоден для эксплуатации на улице, под ультрафиолетом
2	PETG, полиэтилентерефталат – гликоль	-40 ...+65	235 сопло 75 стол	Дихлорметан	Универсален, не несущие детали	Пригоден любой адгезив
3	ABS, акрилонитрил бутадиен стирол	-40... +90	240-270 сопло 110 стол	Пары ацетона	Универсален	Для адгезии требуется ПВП, БФ-2. При печати требуется термокамера
4	ASA, акрилонитрил стирол	-60... +90	240-270 сопло 110 стол	Пары ацетона	Универсален. Хорошая атмосферостойкость	Для адгезии требуется ПВП, БФ-2. При печати требуется термокамера
5	HIPS, высокоударопрочный полистирол	-40... +70	240-270 сопло 110 стол	Пары ацетона	Универсален, возможна печать растворимых поддержек для деталей из ABS	Для адгезии требуется ПВП, БФ-2. При печати требуется термокамера
6	SAN, сополимер стирола и акрилонитрила	-40... +90	250 сопло 110 стол	Пары ацетона	Художественная печать	Для адгезии требуется ПВП, БФ-2.
7	Nylon, Нейлон, полиамид – 6, полиамид – 6,6, полиамид - 12	-60... +90	230-280 сопло 110 стол	-	Универсален. Используется для печати высоконагруженных и износостойких деталей	Для адгезии требуется БФ-2
8	PC, поликарбонат	-100... +110	270-300 сопло 120 стол	-	Универсален	При печати требуется термокамера
9	PP, полипропилен	-20... +120	250-270 сопло 120 стол	-	Легкие и термостойкие технические детали	Адгезивен только к листу полипропилена
10	PVB, поливинил бутираль	Нет данных	210 сопло 60 стол	Спирт	Универсален. Возможна печать растворимых поддержек.	Пригоден любой адгезив

**Таблица 2.**  
**Качественное сравнение механических характеристик 1-компонентных филоментов\***

№	Обозначение, наименование	Прочность	Жесткость	Ударостойкость	Изностостойкость	Усадка	Спекаемость	Примечания
1	PLA, полилактид	5	5	2	4	1	4	Возможна закалка
2	PETG, полиэтилентерефталат – гликоль	5	3	2	4	1	4	Требуется сушка филомента
3	ABS, акрилонитрил бутадиен стирол	3	4	5	1	4	2	Расслаивается. при дефектах необходим обдув
4	ASA, акрилонитрил стирол	3	4	5	1	4	2	Расслаивается. при дефектах необходим обдув.
5	HIPS, высокоударопрочный полистирол	2	4	5	1	4	2	Растворим
6	SAN, сополимер стирола и акрилонитрила	3	5	1	1	4	2	
7	Nylon, Нейлон, полиамид – 6, полиамид – 6,6, полиамид - 12	5	3	4	5	4	5	Сушка филомента обязательна. Тонкие детали теряют жесткость и становятся упругими
8	PC, поликарбонат	3	4	4	5	4	2	Расслаивается. при дефектах необходим обдув
9	PP, полипропилен	3	3	5	5	4	5	Тонкие детали теряют жесткость и становятся упругими
10	PVB, поливинил бутираль	4	4	2	4	2	4	

\*Оценка дана по 5-балльной шкале, где 1 – крайне низкая, 5 – крайне высокая степень проявления свойств.

### Библиографический список

- Варсеев Д.Н.** Предпосылки и сдерживающие факторы импортозамещения двигателей маломерных судов / Д.Н. Варсеев, А.В. Павлов, Д.А. Двинин, Д.С. Поткина // Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы. Материалы XII Международной научно-практической конференции ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов, студентов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2024. С.186-189.

2. **Хрунков, С.Н.** Оптимизация параметров двигателей силовых установок экранопланов / С.Н. Хрунков, Ю.П. Кузнецов, Н.А. Кузьмин, Ю.И. Молев, А.А. Миронов, А.А. Крайнов // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3-1 (65). С. 138-142.
3. **Кугаевский, С.С.** Реверс-инжиниринг и быстрое прототипирование в машиностроении: учебно-методическое пособие / С.С. Кугаевский. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2023. – 98 с.
4. **Khimich, V.L.** About the indicator of energy efficiency of ships / V.L. Khimich, Y.P. Kuznetsov, P.I. Bazhan, A.V. Soloviev, S.N. Khrunkov // Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012-021.
5. **Зеленов, С.Н.** Особенности выбора движительного комплекса речных судов / С.Н. Зеленов, Е.С. Шишов // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 40-49.
6. **Шишов, Е.С.** Экспериментальный стенд для исследования масштабных моделей водометных движителей / Е.С. Шишов, С.Н. Зеленов // Транспортные системы. 2024. № 2 (32). С. 18-23.
7. **Павлов, А.В.** Применение метода реверсивного инжиниринга и аддитивных технологий в производстве движителей маломерных судов / А.В. Павлов, С.Н. Хрунков, Д.Н. Варсеев, Д.А. Двинин, А.А. Гусев // Будущее технической науки: сборник материалов XXIII Всероссийской молодежной научно-техн. конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. С. 548-549.
8. **Павлов, А.В.** Исследование технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования в машиностроении / А.В. Павлов, С.Н. Хрунков, Е.С. Глумова, А.Д. Филинских // КОГРАФ-2024. сборник материалов 34-й Всероссийской молодежной научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. С. 80-86.
9. **Глумова, Е.С.** Автоматизация процесса фотограмметрической съемки объектов / Е. С. Глумова, Е.Д. Лашук, А.Д. Филинских // КОГРАФ-2021: Сборник материалов 31-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам, Нижний Новгород, 19-22 апреля 2021 г. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. С. 15-24.
10. **Павлов, А.В.** Трехмерное моделирование движителей маломерных судов по данным лазерного сканирования / А.В. Павлов, Е.С. Глумова, О.В. Судаков // Будущее технической науки: сборник материалов XXIII Всероссийской молодежной научно-техн. конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. С. 87-88.