

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.023+678.742  
EDN: GKLWPX

Д.А. Романюта, Е.А. Чуреев  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия

### ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДНА ИЗ ВИНИПЛАСТА

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является термопластичный материал (термопласт) – винипласт. Цель – обоснование возможности применения расчетной модели изотропного линейно-упругого материала к объекту исследования при определении размеров связей корпуса судна на ранних этапах проектирования.

**Материалы и методы.** Материалами являются образцы термопластов (винипласт и полиэтилен низкого давления – ПНД), а также нормативная техническая документация мировых классификационных обществ и научные работы, опубликованные в отечественных и зарубежных изданиях. В работе использованы экспериментальные методы для определения физико-механических характеристик рассматриваемых материалов и классические методы расчетов балок и пластин.

**Основные результаты.** Приведен анализ правил мировых классификационных обществ в части проектирования судовых корпусных конструкций из термопластов. Представлены результаты экспериментальных исследований винипласта и ПНД на изотропные и вязкоупругие свойства. Выполнено экспериментальное исследование балок и пластин из рассматриваемых материалов на изгиб. Проанализировано расхождение полученных экспериментальных результатов с расчетными значениями из условия рассмотрения объектов как изотропных и линейно-упругих.

**Заключение.** Обоснована состоятельность гипотезы о возможности подбора размеров элементов конструкции корпуса судна из винипласта при условии рассмотрения данного материала как изотропного и линейно-упругого. Расхождения в расчетных величинах, получаемых вследствие игнорирования анизотропных и вязкоупругих свойств, предлагается предусмотреть в коэффициентах запаса прочности при проектных расчетах.

**Ключевые слова:** винипласт, полиэтилен низкого давления, термопласты, линейная упругость, вязкая упругость, анизотропия.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SHIP DESIGN AND STRUCTURE

UDC 629.5.023+678.742  
EDN: GKLWPX

D.A. Romanyuta, E.A. Chureev  
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

### JUSTIFICATION OF THE APPROACH TO DESIGNING A VINYL PLASTIC SHIP HULL STRUCTURE

**Object and purpose of research.** The object of the study is a polymer non-composite material (PNM) – vinyl plastic. The goal is to substantiate the possibility of using the calculation model of an isotropic linear elastic material to the object of study when determining the dimensions of the ship's hull connections at the early stages of design.

**Materials and methods.** The materials of the study are samples of thermoplastics (vinyl plastic and HDPE), as well as normative technical documentation of world classification societies and scientific works published in domestic and foreign

*Для цитирования:* Романюта Д.А., Чуреев Е.А. Обоснование подхода к проектированию конструкции корпуса судна из винипласта. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 83–94.

*For citations:* Romanyuta D.A., Chureev E.A. Justification of the approach to designing a vinyl plastic ship hull structure. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 83–94 (in Russian).

publications. Experimental methods were used as research methods to determine the physical and mechanical characteristics of the materials under consideration, and classical methods for calculating beams and plates.

**Main results.** The article presents an analysis of the Rules of world classification societies in terms of designing ship hull structures made of thermoplastics. The article presents the results of experimental studies of vinyl plastic and HDPE for isotropic and viscoelastic properties. An experimental study of beams and plates made of the materials under consideration for bending was performed. The discrepancy between the obtained experimental results and the calculated values from the condition of considering these objects made of isotropic and linear-elastic material was analyzed.

**Conclusion.** In this paper, the validity of the hypothesis on the possibility of selecting the dimensions of the elements of the hull structure of a ship made of vinyl plastic is substantiated, provided that this material is considered isotropic and linearly elastic. It is proposed to provide for discrepancies in the calculated values obtained as a result of ignoring anisotropic and viscoelastic properties in the safety factors in design calculations.

**Keywords:** vinyl plastic, low-density polyethylene, thermoplastic, linear elasticity, viscous elasticity, anisotropy.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В настоящее время в научно-образовательном центре судостроения, морской инфраструктуры и техники ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» проводятся исследования, касающиеся возможности применения непластифицированного поливинилхлорида (винипласта) в качестве основного материала корпуса малотоннажных судов.

Выполнен комплекс испытаний по определению физико-механических свойств материала [1], ведется разработка экспериментальной установки для проведения испытаний на ультрафиолетовое старение, исследуется влияние параметров механической обработки на физико-механические свойства материала, готовятся испытания на усталость при изгибе, исследования на воздействие нефтепродуктами и т.д.

Винипласт – синтетический термопластичный материал, получаемый реакцией полимеризации мономера винилхлорида без применения пластификаторов [2]. Другие названия винипласта – непластифицированный поливинилхлорид (НПВХ), жесткий поливинилхлорид [3].

На данный момент ни в России, ни за рубежом винипласт не используется в качестве основного конструкционного материала. Наиболее близкий аналог НПВХ, применяемый в отрасли, – полиэтилен низкого давления (ПНД), из которого строят малотоннажные суда длиной, как правило, до 20 м [2]. ПНД – термопластичный материал, получаемый реакцией полимеризации этилена при низком давлении.

Известно, что термопласты (винипласт, ПНД и др.) обладают нелинейными упругими, вязкими и пластическими свойствами [4]. В связи с этим проектирование и расчет прочности

конструкции корпуса из подобных материалов является отдельной задачей, требующей особого внимания.

Расчетам конструкций из нелинейно-упругих и вязкоупругих материалов посвящено множество работ [5–10]. Ввиду того, что получение аналитического решения таких задач трудоемко, в большинстве работ рассматриваются различные альтернативные способы, базирующиеся на численных методах и определенных допущениях. В то же время расчет прочности конструкций из подобных материалов в современном программном обеспечении (Ansys, Abaqus, Femap with NX Nastran и др.) не составляет большого труда при наличии необходимых исходных данных – физико-механических характеристик материала. Описанные подходы целесообразны при выполнении проверочных расчетов прочности уже спроектированных конструкций (с учетом физической нелинейности, вязкоупругости и т.д.), однако требуют узкоспециализированных знаний и компетенций.

Поскольку на ранних этапах проектирования отсутствуют детально проработанные корпусные конструкции, использование ПО для прочностных расчетов представляется затруднительным.

С целью формирования прикладного и доступного подхода к определению размеров связей корпуса судна из термопластов в первом приближении, предлагается к рассмотрению следующая гипотеза: возможность выполнения расчета размеров элементов конструкции корпуса судна из условия рассмотрения материала, как изотропного и линейно-упругого.

На основании предыдущих исследований [1] в качестве основного (целевого) материала будет рассмотрен винипласт, а также ПНД как уже используемый в судостроении.

Целью настоящей работы является обоснование состоятельности приведенной гипотезы. Обоснование выполнено в несколько этапов:

- анализ мирового опыта по определению связей корпуса судна из ПНМ;
- исследование анизотропии материалов;
- исследование линейной зависимости между напряжениями и деформациями (линейной упругости) при различных видах нагружения;
- исследования вязкоупругих свойств материала (испытания на релаксацию и ползучесть);
- сравнение расчетных и экспериментальных данных при расчете прочности балок и пластин.

### **Мировой подход к определению размеров связей корпуса судна из термопластов**

A global approach to determining the dimensions of ship hull connections made of thermoplastics

Прежде всего было принято решение проанализировать существующие подходы мировых классификационных обществ (КО) к определению размеров связей судов из полиэтилена низкого давления. Требования отечественных КО к проектированию судов из ПНД отсутствуют [1], в связи с чем был проанализирован зарубежный опыт. Похожее исследование уже было выполнено А.Г. Назаровым, результаты опубликованы в [11].

Обращаясь к зарубежным классификационным обществам, можно выделить пять КО, в той или иной мере регламентирующих процедуру расчета конструкции корпуса судна из ПНД:

1. Bureau Veritas – BV (Франция),
2. Indian Register of Shipping – IRS (Индия),
3. Registro Italiano Navale – RINA (Италия),
4. Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd – DNV GL (Германия/Норвегия),
5. Turk Loydu – TL (Турция).

Рекомендации IRS [12], DNV GL [13], и TL [14] сводятся к единственному пункту, регламентирующему минимальные толщины бортовой и днищевой обшивки судна, которые определяются по формуле (1):

$$t_y = ks \sqrt{\frac{PF}{L \cdot 6,7}} (14 + 3,6L), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от используемого материала;  $s$  – шпация;  $L$  – длина судна;  $PF$  – коэффициент давления (для борта –  $PF_s$ ,

для днища –  $PF_b$ ), определяемый по рисункам, представленным в [12–14], и зависящий от длины и скорости судна. Определение размеров балок набора, а также выполнение дополнительных расчетов должны быть выполнены «прямыми методами».

Как отмечено в [11], толщины, получаемые по формуле (1), имеют эмпирическое происхождение и, видимо, привязаны к практике постройки судов.

Определение размеров набора судна из ПНД по итальянскому КО изложено в [15]. В соответствии с данными требованиями подход к определению размеров связей корпуса из ПНД аналогичен подходу для алюминиевого корпуса, с учетом определенных поправок на допускаемые напряжения и деформации. Таким образом, RINA допускает применение расчетных схем как для изотропного, так и для линейно-упругого материала для судовых конструкций из ПНД.

Определение размеров связей корпуса судна из ПНД по французскому КО изложено в [16]. Анализ расчетных формул свидетельствует о рассмотрении ПНД как изотропного и линейно-упругого материала, по аналогии с [15].

Таким образом, анализ мирового опыта свидетельствует о применимости предлагаемого подхода. Следовательно, сформированная ранее гипотеза может оказаться состоятельной.

### **Исследование анизотропии**

Anisotropy study

Полиэтилен низкого давления, как и непластифицированный поливинилхлорид, в основном изготавливается методом экструзии. Следовательно, уместен вопрос о наличии разницы в физико-механических свойствах материалов, изготовленных из листа вдоль и поперек направления экструзии – трансверсальной изотропии (для упрощения в настоящей работе будет использоваться термин «анизотропия»).

При проведении исследований на анизотропию были задействованы три вида материалов, ранее используемых в работе [1]:

1. полиэтилен низкого давления, производимый ООО «Техноком» (ПНД ТК);
2. винипласт, производимый ПАО «Владимирский химический завод» (ВП ВХЗ);
3. винипласт, производимый ООО «Ялукс Групп» (ВП RS-Rigid).

Выбор двух данных видов винипластов обусловлен тем, что сегодня в России листовой непластифицированный ПВХ из первичного сырья изго-

тавливают только два упомянутых предприятия. Таким образом, в работе задействованы материалы всех представителей отечественного производства НПВХ. Полиэтилен низкого давления, как материал, уже используемый в качестве основного конструкционного материала в судостроении, в настоящем исследовании используется в качестве эталона для сравнения.

Информации в отношении изотропии/анизотропии материалов рассматриваемых производителей найти не удалось, в связи с чем был выполнен обзор публикаций по этой тематике касаемо НПВХ и ПНД.

В работе [17] выполнено исследование физико-механических свойств ПНД и непластифицированного ПВХ на растяжение, сжатие и ударные воздействия. Согласно приведенным результатам физико-механические свойства ПНД практически не зависят от направления экструзии (т.е. материал можно считать изотропным), в то время как у винилпласта имеется заметная разница. Данных по модулю упругости не представлено, но данные по пределу текучести НПВХ свидетельствуют о том, что наибольший предел текучести наблюдается у образцов, изготовленных поперек направления экструзии, наименьший – у образцов, изготовленных вдоль направления экструзии.

В работе [18] исследованы физико-механические свойства двух различных полиэтиленов

с точки зрения модуля упругости, напряжения пластического течения и зависимости предела текучести от скорости деформации. Согласно представленным результатам полиэтилен низкого давления не проявляет анизотропных свойств.

В статье [19] авторы проводят серию экспериментальных исследований над полиэтиленом низкого давления, в т.ч. изучают его анизотропные свойства по отношению к направлению экструзии. По результатам опытов авторы приходят к выводу, что физико-механические свойства ПНД до достижения предела текучести практически не зависят от направления экструзии, т.е. материал можно считать изотропным.

Таким образом, можно предположить, что для ПНД физико-механические свойства в плоскости листа не зависят от направления экструзии, а применительно к НПВХ свойственно явление анизотропии.

С целью проверки данного тезиса была изготовлена серия образцов для выполнения испытаний на растяжение, сжатие и изгиб по ГОСТам 11262-2017, 4651-2014 и 4648-2014 соответственно. Толщина всех образцов – 5–6 мм. Испытания проводились на универсальной испытательной машине РЭМ-50-А-1-2 (свидетельство о поверке средства измерений № С-БС/14-05-2025/437798635, действительно до 13.05.2026).

На листовых материалах ПНД и винилпласта отсутствует информация о направлении экструзии.

**Таблица 1.** Результаты исследования изотропии/анизотропии полиэтилена низкого давления и непластифицированного поливинилхлорида

**Table 1.** Results of the study of isotropy/anisotropy of HDPE and PVC-U

	ПНД ТК	ВП RS-Rigid	ВП ВХЗ
<b>Растяжение</b>			
Предел текучести, МПа	23,2/22,9 [1,43 %]	42,6/39,4 [7,51 %]	57,2/45,7 [20,1 %]
Модуль упругости, МПа	980/951 [3,01 %]	3176/3427 [7,90 %]	3289/2767 [15,9 %]
<b>Изгиб</b>			
Предел прочности, МПа	33,1/33,2 [0,32 %]	76,7/75,1 [2,12 %]	95,9/90,7 [5,76 %]
Модуль упругости, МПа	809/772 [4,80 %]	3066/3237 [5,58 %]	3273/3192 [2,55 %]
<b>Сжатие</b>			
Предел текучести, МПа	15,1/14,6 (условный) [3,31 %]	57,0/60,0 [5,26 %]	64,7/62,6 [3,35 %]
Модуль упругости, МПа	306/305 [0,33 %]	763/796 [4,33 %]	1162/1201 [3,36 %]

В связи с этим образцы были вырезаны в двух взаимно перпендикулярных направлениях с обозначениями «направление 1» и «направление 2». Результаты испытаний представлены в табл. 1. Число перед чертой показывает значение для образцов, изготовленных в «направлении 1», за чертой – для образцов в «направлении 2». Число в квадратных скобках отражает процент анизотропии по каждому из указанных параметров.

Во время проведения испытаний выполнялась запись диаграмм нагружения в каждом виде испытаний. Впоследствии диаграммы, полученные с испытательной машины (в системе координат «сила/перемещение»), были пересчитаны по соответствующим ГОСТам в диаграммы с системой координат «напряжение/деформация». Типовые диаграммы на растяжение и изгиб представлены в [1]. На данных диаграммах однозначно прослеживается предел текучести при испытаниях на растяжение и предел прочности на диаграммах при испытаниях на изгиб. Пример типовых диаграмм, полученных в ходе испытаний на сжатие, представлен на рис. 1 (см. вклейку).

Испытания проведены при температуре 23,6 °С и влажности 55 %. Скорость – 2 мм/мин.

На данных диаграммах однозначно прослеживается напряжение, соответствующее пределу текучести для обоих винипластов. В то же время для ПНД данная точка носит условный характер (что и отмечено в табл. 1). В связи с этим при анализе напряжений на сжатие у ПНД принято решение оперировать напряжением, соответствующим относительной деформации 0,05 (5 %).

Данные, представленные в табл. 1, подтверждают, что ПНД можно рассматривать как изотропный материал. Данные по НПВХ свидетельствуют о наличии некоторой анизотропии до 20 %. При этом материал от производителя ООО «Ялукс-Групп» характеризуется меньшей анизотропией, чем винипласт от ПАО «ВХЗ».

## **Исследование линейной зависимости между напряжениями и деформациями**

Investigation of a linear relationship between stresses and strains

Для определения наличия линейной зависимости между напряжением и деформацией необходимо ограничиться определенным диапазоном напряжений. Нижнюю границу диапазона было решено ограничить 2 МПа, за счет чего удалось исключить

начальный участок диаграммы, при котором происходят выборка захватов, обжатие образца и прочие переходные процессы.

Верхнюю границу диапазона целесообразно ограничить значением допускаемых напряжений, предусмотренных КО. Данный вопрос требует особого рассмотрения, но частично уже был затронут в работе [11] применительно к ПНД. Значения допускаемых напряжений и соответствующих коэффициентов запаса для винипластовых судовых конструкций на данный момент отсутствуют.

Вопрос нормирования коэффициентов запаса прочности для ПНД раскрыт в зарубежных КО по отношению к различным типам связей (пластины, основные балки набора, дополнительные ребра жесткости и др.) и условий работы (для общей или местной прочности). На данном этапе принято решение обозначить верхнюю границу диапазона рассматриваемых напряжений как половину от максимального напряжения (что соответствует коэффициенту запаса, равному 2).

Начальные участки диаграмм «напряжение/деформация» при растяжении по всем материалам продемонстрированы на рис. 2 (см. вклейку), на изгиб – на рис. 3 (см. вклейку), на сжатие – на рис. 4 (см. вклейку). По рисункам видно, что начальные участки диаграмм по всем материалам и всем видам рассмотренных испытаний соответствуют линейной зависимости с достаточно высоким коэффициентом корреляции.

Анализ представленных результатов позволяет использовать допущение о применимости закона Гука в рассматриваемом диапазоне напряжений, что в свою очередь свидетельствует о частичной состоятельности предлагаемой гипотезы.

## **Исследования вязкоупругих свойств материала. Испытания на релаксацию и ползучесть**

Research of viscoelastic properties of material. Relaxation and creep tests

В рамках исследования возможности применения полимерных материалов в качестве конструкционных необходимо учитывать их вязкоупругость. В случае наличия ярко выраженных вязкоупругих свойств использование расчетной модели изотропного и линейно-упругого тела может оказаться неподходящей для выполнения даже оценочных расчетов прочности судовых конструкций.

Поиск соответствующей информации по отечественным винипластам не дал положительных

результатов, однако наличие вязкоупругости у ПНД и непластифицированного ПВХ уже подтверждено различными исследованиями ([20, 21] и [22, 23] соответственно).

Для подтверждения найденной информации была выполнена экспериментальная оценка вязкоупругих свойств винипластов и ПНД отечественных производителей с помощью статических испытаний на ползучесть и релаксацию.

Испытание на релаксацию заключается в приложении к образцу материала постоянного значения определенной деформации и фиксации значения напряжения в образце в течение времени. Эксперимент проводился путем приложения к образцу по ГОСТ 11262-2017 растягивающей нагрузки на вышеупомянутой универсальной испытательной машине РЭМ-50-А-1-2 в 5 ступеней нагружения – для винипласта ступени нагружения соответствуют напряжению при растяжении 5, 10, 15, 20 и 25 МПа, для ПНД – 3, 6, 9, 12 и 15 МПа. Семейство кривых релаксации для ВП ВХЗ представлено на рис. 5 (см. вклейку), для ВП RS-Rigid – на рис. 6

(см. вклейку), для ПНД ТК – на рис. 7 (см. вклейку). Время выдержки образцов на каждой ступени нагружения – 1,5 часа. Испытание проводилось при температуре 24,5 °С и влажности 43 %.

Для оценки вязкоупругих свойств материалов была проанализирована величина падения напряжения на каждой ступени нагружения в течение 90 минут: чем больше падает напряжение за установленное время, тем существеннее проявляются вязкоупругие свойства. В табл. 2 представлено значение падения напряжения по каждой ступени в процентах.

По результатам испытаний на релаксацию однозначно видно, что полиэтилен низкого давления имеет более выраженные вязкоупругие свойства, чем непластифицированный поливинилхлорид.

Испытание на ползучесть заключается в приложении к образцу материала постоянного значения определенного усилия и фиксации изменения удлинения в образце в течение времени. Испытание проводилось при растяжении по ГОСТ 18197-2014.

**Таблица 2.** Падение напряжения на каждой ступени нагружения за 90 минут

**Table 2.** Stress drop at each loading stage for 90 minutes

ВП ВХЗ		ВП RS-Rigid		ПНД ТК	
Ступень, МПа	Падение напряжения, %	Ступень, МПа	Падение напряжения, %	Ступень, МПа	Падение напряжения, %
5,0	6,31	5,0	11,24	3	24,86
10,0	6,22	10,0	9,59	6	32,66
15,0	6,31	15,0	11,72	9	36,90
20,0	7,11	20,0	13,91	12	41,05
25,0	10,07	25,0	13,14	15	38,88

**Таблица 3.** Относительное номинальное удлинение на каждой ступени нагружения за 2 часа

**Table 3.** Relative nominal elongation at each loading stage for 2 hours

Ступень нагружения, МПа	Относительное удлинение		
	ВП ВХЗ	ВП RS-Rigid	ПНД ТК
30 МПа	0,010	–	–
25 МПа	0,008	0,009	–
20 МПа	0,007	0,006	–
15 МПа	0,004	0,004	0,066
10 МПа	–	–	0,024
7,5 МПа	–	–	0,016
5 МПа	–	–	0,004

Значение максимального напряжения, при котором выполнялось испытание на ползучесть, определялось пределом текучести материала с коэффициентом запаса, равным 2. Ступени нагружения приняты по ГОСТ 18197-2014. Таким образом, ПНД испытан при нагрузках, соответствующих напряжениям 15 МПа, 10 МПа, 7,5 МПа и 5 МПа. ВП ВХЗ испытан при нагрузках, соответствующих напряжениям 30 МПа, 25 МПа, 20 МПа и 15 МПа. При приложении напряжения ниже 15 МПа ползучесть материала практически не наблюдалась. ВП RS-Rigid испытан при нагрузках, соответствующих напряжениям 25 МПа, 20 МПа, 15 МПа. При проведении испытаний с приложением растягивающего напряжения меньше 15 МПа ползучести материала также практически не наблюдалось.

Время выдержки образца на каждой ступени нагружения составляло 2 часа. Измерение удлинения образца выполнялось с помощью экстензометра по рабочей части на базе 55 мм. Испытания проведены при температуре 23,4 °С и влажности 58 %.

Семейство кривых ползучести для ВП ВХЗ представлено на рис. 8 (см. вклейку), для ВП RS-Rigid – на рис. 9 (см. вклейку), для ПНД ТК – на рис. 10 (см. вклейку). В табл. 3 даны значения относительного номинального удлинения по каждому материалу за 2 часа. Дополнительно, для качественного сравнения свойств ползучести материалов, на рис. 11 (см. вклейку) отражены кривые ползучести каждого материала при приложении растягивающего усилия, соответствующего напряжению 15 МПа.

По результатам испытаний на ползучесть, как и на релаксацию, можно говорить о более выраженных вязкоупругих свойствах ПНД, чем винипластов.

Обобщая приведенные выше результаты, можно сделать следующие выводы:

1. полиэтилен низкого давления проявляет практически изотропные свойства, характеризуется линейной зависимостью между напряжениями и деформацией на начальных этапах нагружения при испытаниях на растяжение, сжатие и изгиб, но проявляет ярко выраженную вязкоупругость;
2. непластифицированный поливинилхлорид обладает некоторой анизотропией, характеризуется линейной зависимостью между напряжениями и деформацией на начальных этапах нагружения при испытаниях на растяжение, сжатие и изгиб и обладает умеренной вязкоупругостью.

## Сравнение расчетных и экспериментальных данных при расчете прочности балок и пластин

Comparison of calculated and experimental data in calculating the strength of beams and plates

С целью подтверждения возможности использования расчетной модели изотропного и линейно-упругого тела для расчета конструкций из термопластов выполнен теоретический расчет изгиба балок и пластин с последующим экспериментальным исследованием выбранных расчетных случаев на образцах из рассматриваемых материалов – ВП ВХЗ, ВП RS-Rigid и ПНД ТК.

Для расчета балок на изгиб выбрано три расчетных случая: трехточечный изгиб, четырехточечный изгиб и изгиб консольной балки с жесткой заделкой. Изображение расчетных схем и экспериментальных установок представлено на рис. 12 (см. вклейку).

Профиль всех рассматриваемых балок – полоса, установленная горизонтально при трех- и четырехточечном изгибах и вертикально в случае расчета консоли с заделкой.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов выполнено по определению прогибов выбранного сечения балки. При трехточечном изгибе и изгибе консоли с жесткой заделкой прогиб балки измерялся в точке приложения нагрузки, при четырехточечном изгибе – посередине балки (между ножами). Расчетные формулы для изгиба балок приняты в соответствии с [24].

Максимальное значение прикладываемой нагрузки выбрано из условия достижения допускаемых нормальных напряжений. Результаты исследования изгиба балок представлены в табл. 4. Испытания проведены при температуре 23,6 °С и влажности 52 %. Скорость – 1 мм/мин.

Как следует из табл. 4, расчет отдельных балок из винипласта без учета вязкоупругости, анизотропности и нелинейности физико-механических свойств во всем диапазоне допускаемых напряжений показывает лучшую сходимость с экспериментальными данными, чем расчет балок из ПНД: погрешность в определении прогибов балок из ПНД достигает 42 % против 23 % для балок из винипласта. При этом разница между теоретически и экспериментально полученными значениями для различных винипластов отличается: для винипласта, производимого ПАО «Владимирский химический завод»,

**Таблица 4.** Сравнение результатов изгиба балок

**Table 4.** Comparison of beam bending results

	ВП ВХЗ	ВП RS-Rigid	ПНД ТК
Ширина полосы, мм	35,1	36,0	37,9
Толщина полосы, мм	4,5	4,9	5,7
<b>Трехточечный изгиб</b>			
Максимальное усилие, кгс	4,83	4,82	4,69
Максимальная разница в определении прогибов, %	6,9	17,8	42,3
<b>Четырехточечный изгиб</b>			
Максимальное усилие, кгс	3,02	3,01	2,93
Максимальная разница в определении прогибов, %	8,5	19,4	41,6
<b>Изгиб консоли с жесткой заделкой</b>			
Максимальное усилие, кгс	11,8	11,1	9,75
Максимальная разница в определении прогибов, %	10,9	22,7	34,3

разница в прогибах почти в 2 раза меньше (до 11 %), чем для винипласта от ООО «Ялукс-Групп» (до 23 %).

Необходимо отметить, что при испытаниях балок из винипласта после снятия внешней нагрузки все образцы возвращались в исходное состояние без образования пластических деформаций. Образцы из ПНД после снятия нагрузки демонстрировали существенный остаточный прогиб.



**Рис. 13.** Проведение испытаний пластины на изгиб

**Fig. 13.** Plate bending test

Расчет изгиба пластин выполнен на одном расчетном случае – пластина с жестко защемленными кромками по всему периметру и сосредоточенной силой в центре. Теоретический расчет данного случая выполнен в соответствии с [25]. Процедура проведения испытаний по данному расчетному случаю представлена на рис. 13. Измерение прогиба пластины выполнялось под точкой приложения нагрузки. Испытания проведены при температуре 23,4 °С и влажности 56 %. Скорость – 1 мм/мин.

Результаты расчета и проведения испытаний изгиба пластин представлены в табл. 5.

По результатам расчетов и испытаний пластин во всем диапазоне допустимых усилий применение модели изотропного и линейно-упругого тела для расчета конструкций из винипласта приводит к погрешности определения прогибов в районе 10 %, в то время как применение той же модели расчета для пластины из ПНД приводит к погрешности до 47 %.

## Заключение

### Conclusion

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Некоторые зарубежные классификационные общества в правилах по проектированию конструкции корпуса судна из полиэтилена низкого давления используют методы, соответствующие расчетам конструкций из изотропных и линейно-упругих материалов. Однако вопрос выбора коэффициентов запаса для данных ма-

**Таблица 5.** Сравнение результатов изгиба пластин

**Table 5.** Comparison of plate bending results

	ВП ВХЗ	ВП RS-Rigid	ПНД ТК
Размер пластины 1, мм	150	150	150
Размер пластины 2, мм	150	150	150
Толщина пластины, мм	4,6	5,0	6,0
Максимальное усилие, кгс	30	30	18
Максимальная разница в определении прогибов, %	10,5	11,0	46,6

- териалов требует отдельного внимания при будущих исследованиях.
- Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует о том, что винипласт имеет некоторые анизотропные свойства (до 20 %), в то время как полиэтилен низкого давления является практически изотропным, что подтверждает информацию, приведенную в [17–19].
  - Рассматриваемые полимерные материалы (винипласт и ПНД) на начальном участке кривых «нагрузка/деформация» при испытаниях на растяжение, сжатие и изгиб демонстрируют практически линейную зависимость с достаточно высоким коэффициентом корреляции.
  - Полиэтилен низкого давления имеет более выраженные вязкоупругие свойства по сравнению с непластифицированным ПВХ, о чем свидетельствуют результаты испытаний на ползучесть и релаксацию.
  - Использование расчетной модели изотропного и линейно-упругого материала для полиэтилена низкого давления на примере расчета балок и пластины демонстрирует большое расхождение между теоретическим расчетом и натурным экспериментом (до 42 %). Применение той же расчетной модели для винипласта приводит к погрешностям в определении прогибов балок и пластины до 23 % для НПВХ от ООО «Ялукс-Групп» и до 11 % для ВП от ПАО «ВХЗ». Несмотря на то, что испытания образцов выполнены при нагрузках, соответствующих линейной области деформирования материалов, полученная разница между теоретическими и экспериментальными данными может быть обусловлена вязкоупругими свойствами. Испытания проводились при небольшой скорости (1 мм/мин), а вязкоупругие свойства материалов, как показали опыты, проявляются даже при малых напряжениях. С целью подтверждения данной гипотезы авторы планируют работы

по расчету упомянутых расчетных схем с учетом вязкоупругих свойств материала и сравнению полученных результатов с экспериментальными данными.

Таким образом, авторы приходят к выводу о состоятельности гипотезы о возможности подбора размеров элементов конструкции корпуса судна из винипласта в первом приближении (на ранних этапах проектирования) при условии рассмотрения данного материала как изотропного и линейно-упругого. В этом случае расхождения между теоретическими расчетами и экспериментальными данными могут быть учтены в коэффициенте запаса. Назначение коэффициентов запаса прочности для судовых конструкций из термопластов требует отдельного исследования с проработкой множества факторов: влияния температуры, концентраторов напряжений, фотодеструкции, потенциального водопоглощения и пр.

Применительно к судовым конструкциям из ПНД предлагаемую гипотезу можно считать несостоятельной по причине относительно большого расхождения между теоретическими расчетами и экспериментальными данными (до 40 %), а также сильно выраженных вязкоупругих свойств.

Следует обратить внимание, что при проектировании судовых корпусных конструкций из термопластов (независимо от конкретного вида материала), даже если размеры связей в первом приближении получены из допущения рассмотрения материала как изотропного и линейно-упругого, необходимо выполнять проверочные расчеты прочности с учетом реальных физико-механических свойств применяемого материала (вязкоупругость, анизотропность и др.).

### Список использованной литературы

- Романюта Д.А., Чуреев Е.А., Кисель А.Г. Исследование физико-механических характеристик винипластов для использования в малотоннажном судо-

- строении // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2, т. 1. С. 15–24. DOI: 10.37220/МИТ.2025.68.2.001.
2. Романюта Д.А. Перспективы использования жесткого поливинилхлорида в малотоннажном судостроении // Известия КГТУ. 2024. № 73. С. 111–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124.
  3. ГОСТ 9639-71. Листы из непластифицированного поливинилхлорида (винипласт листовой). Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 12 с.
  4. Гаршин О.К., Корляков А.С., Шадрин В.В. Моделирование упруго-вязко-пластических свойств термопластических полимеров. Комплексный экспериментально-теоретический подход // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 2. С. 208–218. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.21.
  5. Павлов М.С. Решение задач линейной вязкоупругости изотропного и анизотропного тела на основе метода разделения переменных: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Нац. исслед. Томский гос. ун-т. Томск, 2022. 33 с.
  6. Манабаев К.К. Модификации приближенных методов расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из вязкоупругих и композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Нац. исслед. Томский гос. ун-т. Томск, 2016. 22 с.
  7. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Пер. с англ. М.И. Рейтмана. Москва: Мир, 1974. 338 с.
  8. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. Москва: Стройиздат, 1978. 208 с.
  9. Горбачева О.А. Расчет конструкций из нелинейно-упругого материала модифицированным методом последовательных нагружений // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2(17). С. 28–31. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_2\_28.
  10. Нелинейный расчет балок из упругопластического материала методом переменных параметров упругости / Т.С. Давыдова, В.С. Попова, Н.И. Харченко, А.Д. Ловцов // Материалы 61-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ. Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2021. С. 131–134.
  11. Королев С.А., Назаров А.Г. Особенности оценки прочности корпусов судов из полиэтилена // Новые технологии в судостроении НТС-2024: сборник трудов III отраслевой научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ЦТСС, 2024. С. 106–114.
  12. Guidelines on Hull structure of thermoplastic vessels (Provisional) / Indian Register of shipping. [S. l.], 2024. 15 p.
  13. DNVGL-ST-0342. Craft. [S. l.]: DNV GL, 2016. 135 p.
  14. Tentative Rules for Polyethylene Crafts. İstanbul: Turk Loydu, 2014. 10 p.
  15. Rules for the classification of ships with plastic, aluminium alloy or wooden hulls. [S. l.], 2023. 168 p.
  16. NR546. Hull in Composite, Plywood and High Density Polyethylene Materials. Paris: Bureau Veritas, 2022. 134 p.
  17. Impact on HDPE and PVC plates – Experimental tests and numerical simulations / R.T. Moura, A.H. Clausen, E. Fagerholt [et al.] // International journal of impact engineering. 2010. Vol. 37. P. 580–598. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2009.12.004.
  18. Static and dynamic properties of semi-crystalline polyethylene / M. Xu, G. Huang, S. Feng [et al.] // Polymers. 2016. Vol. 8, No. 4. P. 77 (14 p.). DOI: 10.3390/polym8040077.
  19. Anisotropic mechanical behavior of semi-crystalline polymers: Characterization and modeling of non-monotonic loading including damage / K. Mrabet, O. Terfas, C.P. Laurent, R. Rahouadj // Journal of applied polymer science. 2016. Vol. 134, No. 7. P. 44468 (11 p.). DOI: 10.1002/app.44468.
  20. Modeling of Stress Relaxation Behavior in HDPE and PP Using Fractional Derivatives / K.L. Segura-Méndez, J.G. Puente-Córdova, F.Y. Rentería-Baltérrez [et al.] // Polymers (Basel). 2025. Vol. 17, No. 4. P. 453 (23 p.). DOI: 10.3390/polym17040453.
  21. Стеценко Н.С., Хохлов А.В. Идентификация нелинейного определяющего соотношения Работнова по данным испытаний полиэтилена и полипропилена на ползучесть // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 1–23.
  22. Soares A.K., Covas D.I.C., Reis L.F.R. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer // Journal of hydraulic engineering. 2008. Vol. 134, No. 9. P. 1389–1994. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000148.
  23. Calaf-Chica J., Diez P. M.B., Calzada M.P. Viscoelasticity and the small punch creep recovery test: numerical analysis and experimental tests on the applicability for polyvinyl chloride (PVC) // Mechanics of materials. 2021. Vol. 161. P. 104016 (11 p.). DOI: 10.1016/J.MECHMAT.2021.104016.
  24. Справочник по строительной механике корабля: [В 3 т.]. Т. 1 / Под общ. ред. акад. Ю.А. Шиманского. Ленинград: Судпромгиз, 1958–1960. 3 т. Т. 1 / [Сост.: А.Б. Знаменский, А.З. Локшин, В.Н. Серов и др.]. 1958. 627 с.
  25. Young W.C., Budynas R.G. Roark's formulas for stress and strain. 7<sup>th</sup> ed. New York [et al.]: McGraw-hill, 2002. XII, 852 p.

## References

1. Romanyuta D.A., Chureev E.A., Kisel A.G. Study of physical and mechanical characteristics of vinyl plastics for use in small-tonnage shipbuilding // Marine Intellectual Technologies. 2025. No. 2-1. P. 15–24. DOI 10.37220/MIT.2025.68.2.001 (in Russian).
2. Romanyuta D.A. Prospects for the use of rigid polyvinyl chloride in small-tonnage shipbuilding // KSTU News. 2024. No. 73. P. 111–124. DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124 (in Russian).
3. GOST 9639-71. Sheets of unplasticized polyvinyl chloride (sheet vinyl plastic). Technical conditions. Moscow, 1971. 12 p. (in Russian).
4. Garishin O.K., Korlyakov A.S., Shadrin V.V. Modeling of elastic-viscous-plastic properties of thermoplastic polymers. Complex experimental-theoretical approach // Computational continuum mechanics. 2014. Vol. 7, No. 2. P. 208–218. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.21 (in Russian).
5. Pavlov M.S. Reshenie zadach linejnoj vyazkouprugosti izotropnogo i anizotropnogo tela na osnove metoda razdeleniya peremennyh [Solution of problems of linear viscoelasticity of an isotropic and anisotropic body based on the method of separation of variables]: abstract of Cand. Sci. (Phys. and Math.) dissertation : 01.02.04. Tomsk, 2022. 33 p (in Russian).
6. Manabaev K.K. Modifikacii priblizhennyh metodov rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstrukcij iz vyazkouprugih i kompozicionnyh-materialov [Modifications of approximate methods for calculating the stress-strain state of structures made of viscoelastic and composite materials]: abstract of Cand. Sci. (Phys. and Math.) dissertation. Tomsk, 2016. 22 p. (in Russian).
7. Christensen R. Introduction to the Theory of viscoelasticity / Translated from English by M.I. Reitman; edited by G.S. Shapiro. Moscow : Mir, 1974. 338 p. (in Russian).
8. Lukash P.A. Fundamentals of nonlinear structural mechanics. Moscow : Stroyizdat, 1978. 208 p. (in Russian).
9. Gorbacheva O.A. Calculation of structures made of nonlinear elastic material by a modified method of successive loadings // Expert: Theory and Practice. 2022. No. 2(17). P. 28–31. DOI: 10.51608/26867818\_2022\_2\_28 (in Russian).
10. Nonlinear calculation of beams made of elastic-plastic material by the method of variable elasticity parameters / T.S. Davydova, V.S. Popova, N.I. Kharchenko, A.D. Lovtsov // Proceedings of the 61<sup>st</sup> student scientific and technical conference of the Civil Engineering Institute of Pacific National University: Conference Proceedings, Khabarovsk, April 19-23, 2021. Khabarovsk: Pacific State University, 2021. P. 131–134 (in Russian).
11. Korolev S.A., Nazarov A.G. Features of strength assessment of polyethylene ship hulls. // New technologies in shipbuilding NTS-2024: collection of works of the III industry scientific and technical conference, [November 21–22, 2024]. St. Petersburg: SSTC, 2024. P. 106–114 (in Russian).
12. Guidelines on Hull structure of thermoplastic vessels (Provisional) / Indian Register of shipping. [S. l.], 2024. 15 p.
13. DNVGL-ST-0342. Craft. [S. l.] : DNV GL, 2016. 135 p.
14. Tentative Rules for Polyethylene Crafts. İstanbul : Turk Loydu, 2014. 10 p.
15. Rules for the classification of ships with plastic, aluminium alloy or wooden hulls. [S. l.], 2023. 168 p.
16. NR546. Hull in Composite, Plywood and High Density Polyethylene Materials. Paris : Bureau Veritas, 2022. 134 p.
17. Impact on HDPE and PVC plates – Experimental tests and numerical simulations / R.T. Moura, A.H. Clausen, E. Fagerholt [et al.] // International journal of impact engineering. 2010. Vol. 37. P. 580–598. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2009.12.004.
18. Static and dynamic properties of semi-crystalline polyethylene / M. Xu, G. Huang, S. Feng [et al.] // Polymers. 2016. Vol. 8, No. 4. P. 77 (14 p.). DOI: 10.3390/polym8040077.
19. Anisotropic mechanical behavior of semi-crystalline polymers: Characterization and modeling of non-monotonic loading including damage / K. Mrabet, O. Terfas, C.P. Laurent, R. Rahouadj // Journal of applied polymer science. 2016. Vol. 134, No. 7. P. 44468 (11 p.). DOI: 10.1002/app.44468.
20. Modeling of Stress Relaxation Behavior in HDPE and PP Using Fractional Derivatives / K.L. Segura-Méndez, J.G. Puente-Córdova, F.Y. Rentería-Baltierrez [et al.] // Polymers (Basel). 2025. Vol. 17, No. 4. P. 453 (23 p.). DOI: 10.3390/polym17040453.
21. Stetsenko N.S., Khokhlov A.V. Identification of Rabotnov's nonlinear constitutive relation based on creep test data for polyethylene and polypropylene // Transactions of MAI. 2018. No. 103. P. 1–23 (in Russian).
22. Soares A.K., Covas D.I.C., Reis L.F.R. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer // Journal of hydraulic engineering. 2008. Vol. 134, No. 9. P. 1389–1994. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000148.
23. Calaf-Chica J., Diez P. M.B., Calzada M.P. Viscoelasticity and the small punch creep recovery test: numerical analysis and experimental tests on the applicability for polyvinyl chloride (PVC) // Mechanics of materials.

2021. Vol. 161. P. 104016 (11 p.). DOI: 10.1016/J.MECHMAT.2021.104016.
24. Handbook of ship structural mechanics : [in 3 vol.] / Ed. by Yu.A. Shimansky. Leningrad : Sudpromgiz, 1958–1960. Vol. 1. 627 p. (in Russian).
25. Young W.C., Budynas R.G. Roark's formulas for stress and strain. 7<sup>th</sup> ed. New York [et al.] : McGraw-hill, 2002. XII, 852 p.

---

### Сведения об авторах

*Романюта Дмитрий Александрович*, аспирант по специальности 2.5.18 «Проектирование и конструкция судов» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». Адрес: 236022, Россия, Калининград, Советский пр., д. 1. E-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru.

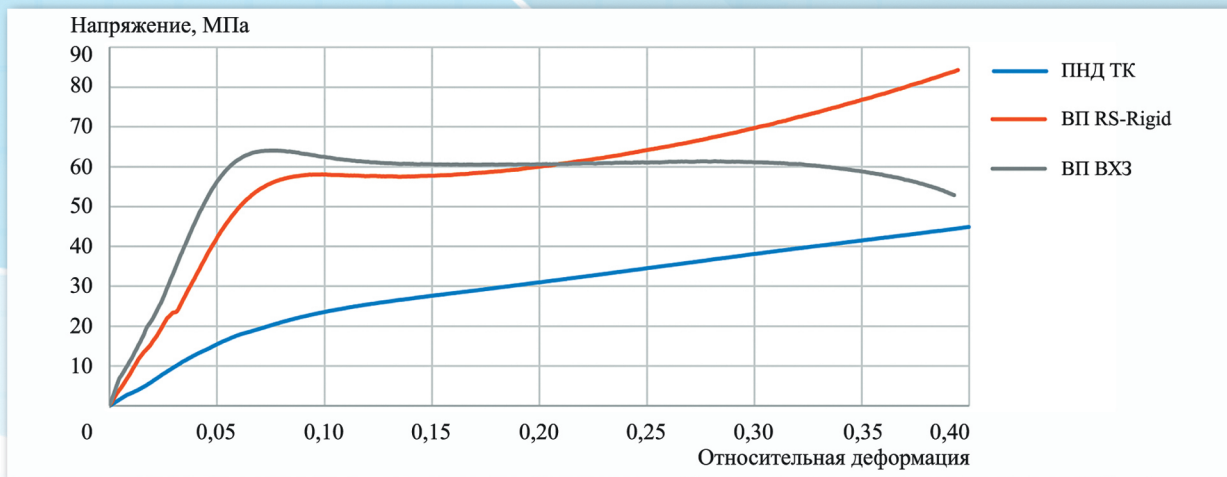
*Чуреев Евгений Андреевич*, к.т.н., директор научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». Адрес: 236022, Россия, Калининград, Советский пр., д. 1. Тел.: +7 (4012) 56-48-22. E-mail: e.chureev@klgtu.ru.

### About the authors

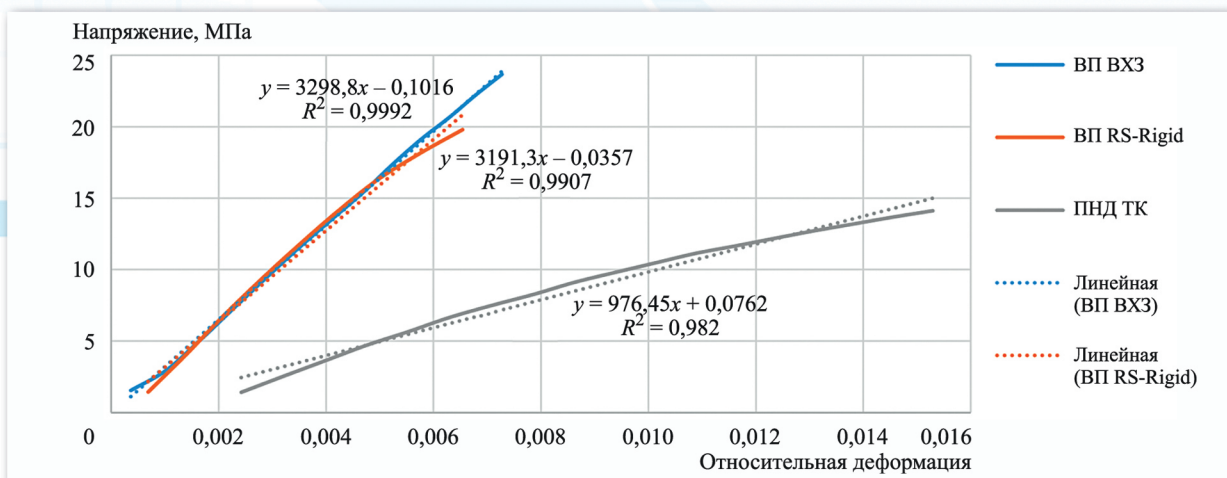
*Dmitry A. Romanyuta*, Postgraduate student for Ship Design and Structure, Kaliningrad State Technical University. Address: 1, Sovetsky pr., Kaliningrad, Russia, post code 236022. E-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru.

*Evgeny A. Chureev*, Cand. Sci. (Eng.), Director, Center of Shipbuilding, Marine Infrastructure and Technology, Kaliningrad State Technical University. Address: 1, Sovetsky pr., Kaliningrad, Russia, post code 236022. Tel.: +7 (4012) 56-48-22. E-mail: e.chureev@klgtu.ru.

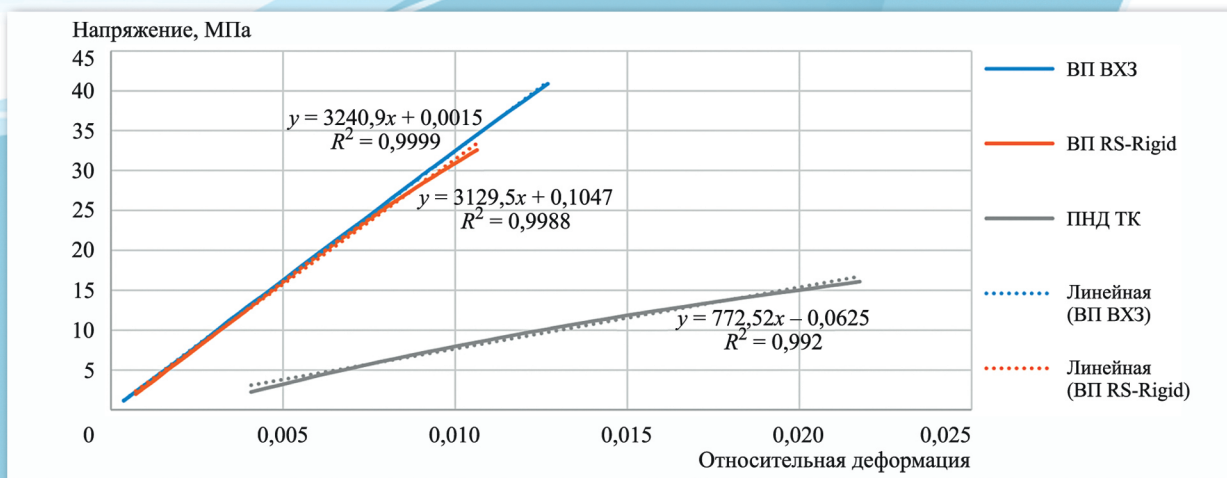
Поступила / Received: 26.08.25  
Принята в печать / Accepted: 20.02.26  
© Романюта Д.А., Чуреев Е.А., 2026



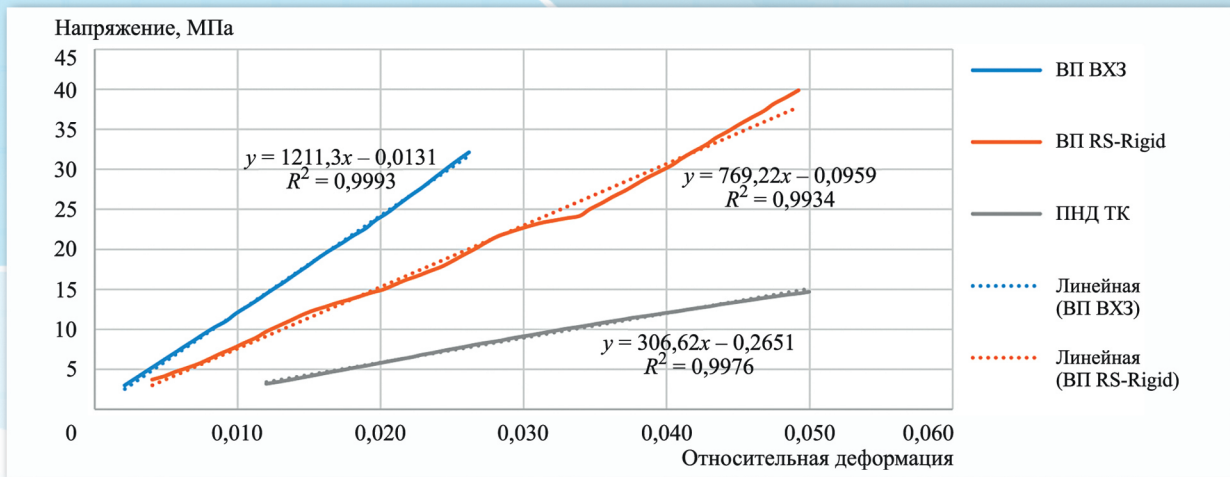
**Рис. 1.** Типовые диаграммы, полученные при испытаниях на сжатие  
**Fig. 1.** Typical diagrams obtained during compression tests



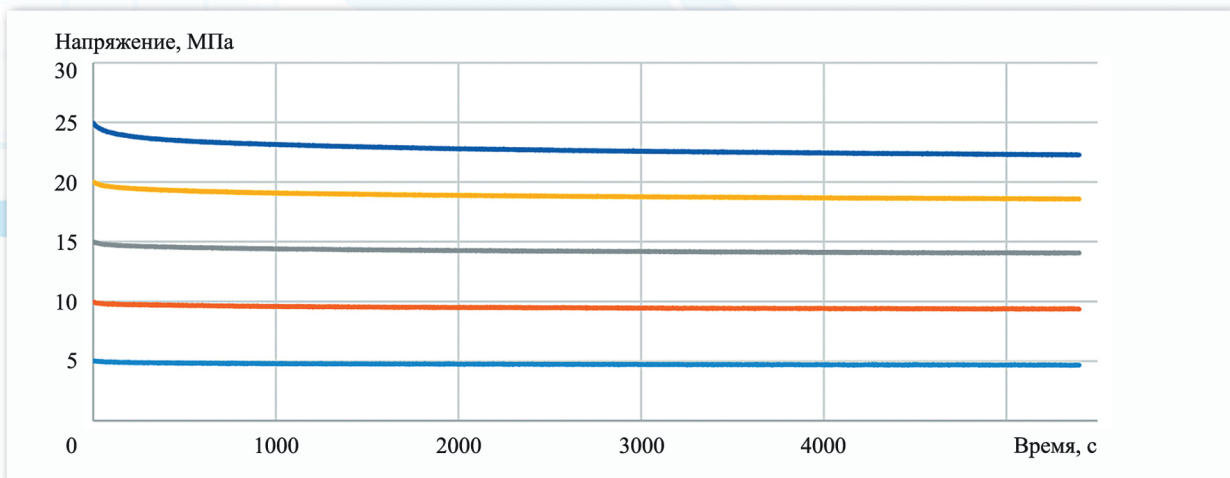
**Рис. 2.** Начальные участки диаграмм при испытаниях на растяжение  
**Fig. 2.** Initial sections of diagrams for tensile tests



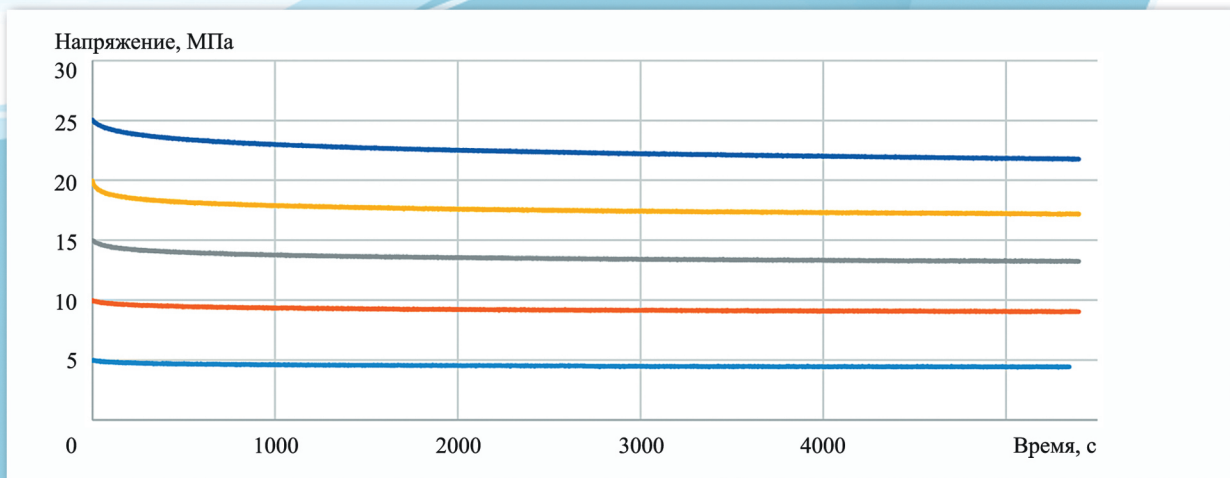
**Рис. 3.** Начальные участки диаграмм при испытаниях на изгиб  
**Fig. 3.** Initial sections of diagrams for bending tests



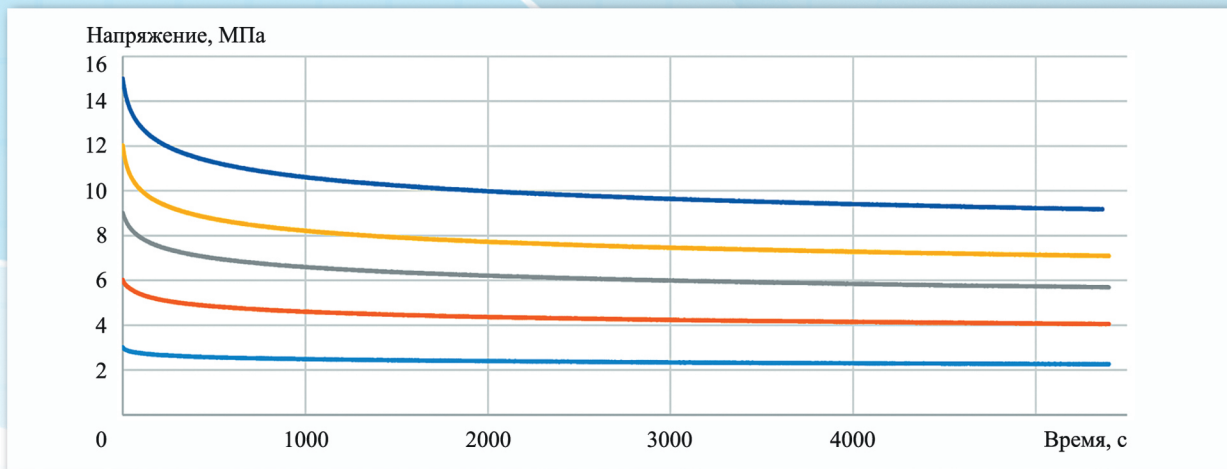
**Рис. 4.** Начальные участки диаграмм при испытаниях на сжатие  
**Fig. 4.** Initial sections of diagrams for compression tests



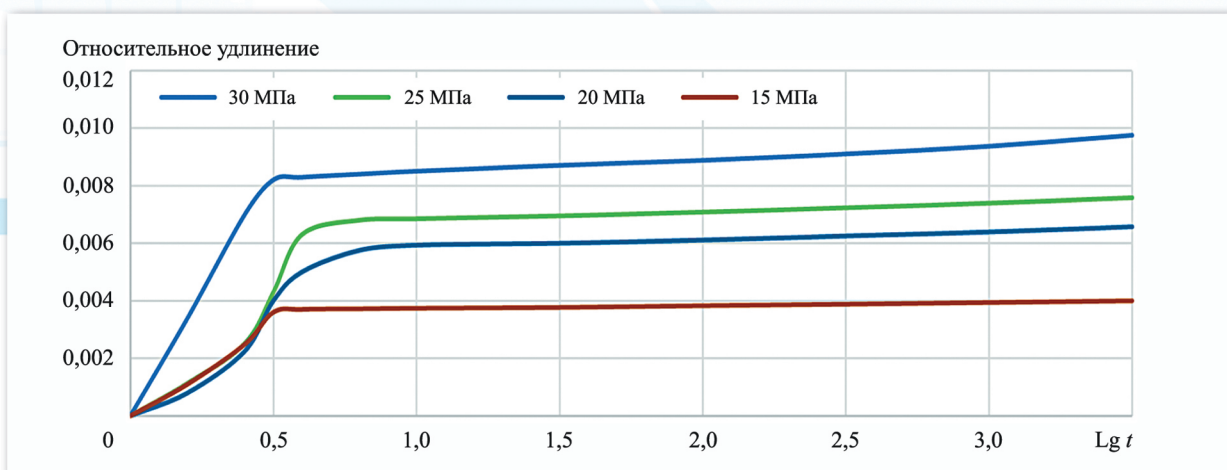
**Рис. 5.** Кривые релаксации для ВП VX3  
**Fig. 5.** Relaxation curves for the UPVC VHZ



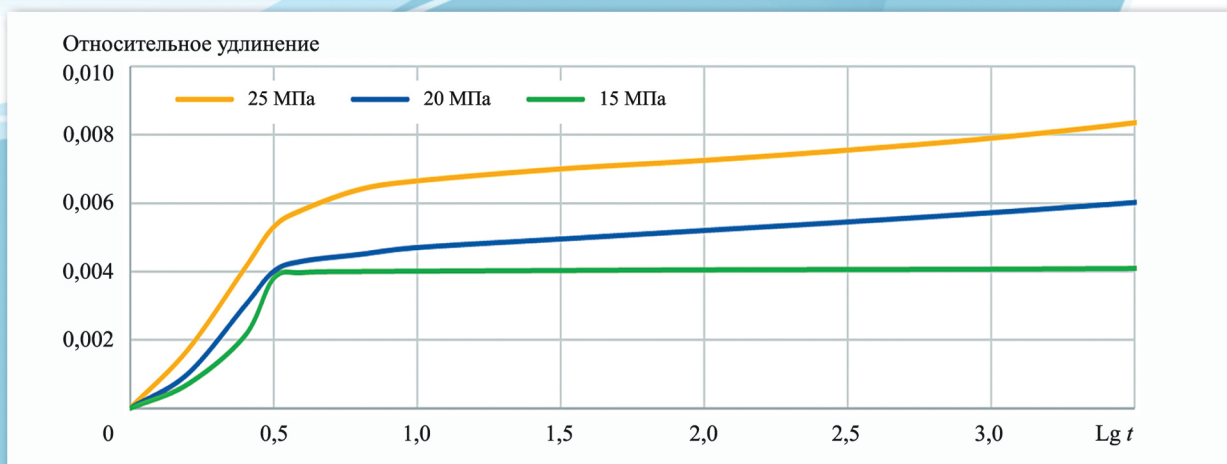
**Рис. 6.** Кривые релаксации для ВП RS-Rigid  
**Fig. 6.** Relaxation curves for the UPVC RS-Rigid



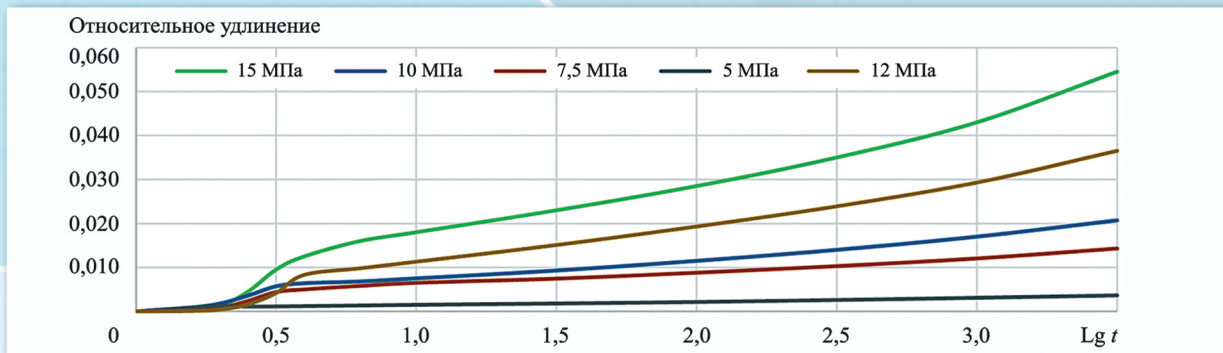
**Рис. 7.** Кривые релаксации для ПНД ТК  
**Fig. 7.** Relaxation curves for the HDPE TK



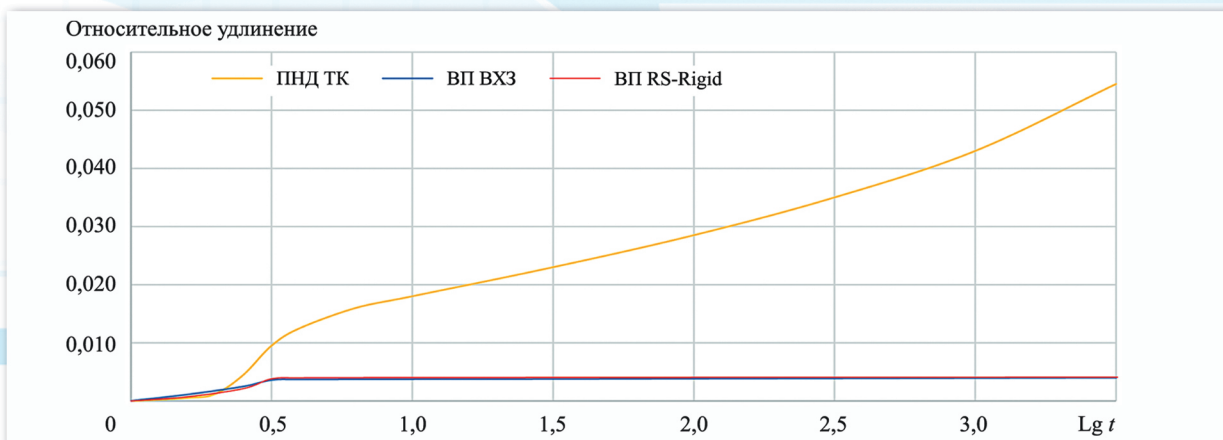
**Рис. 8.** Кривые ползучести для ВП ВХЗ  
**Fig. 8.** Creep curves for UPVC VH3



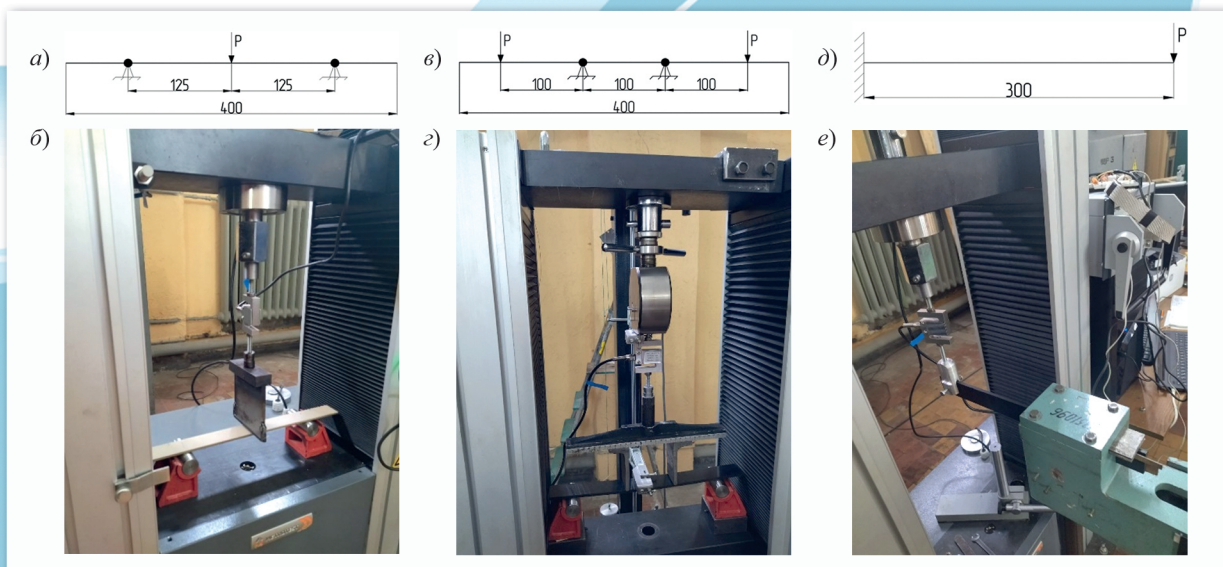
**Рис. 9.** Кривые ползучести для ВП RS-Rigid  
**Fig. 9.** Creep curves for UPVC RS-Rigid



**Рис. 10.** Кривые ползучести для ПНД ТК  
**Fig. 10.** Creep curves for HDPE TK



**Рис. 11.** Кривые ползучести для всех материалов при растягивающем напряжении 15 МПа (кривые для ВП ВХЗ и ВП RS-Rigid визуально накладываются друг на друга)  
**Fig. 11.** Creep curves for all materials at tensile stress of 15 MPa



**Рис. 12.** Расчетные случаи для балок: а), б) – трехточечный изгиб; в), г) – четырехточечный изгиб; д), е) – изгиб консольной балки с жесткой заделкой  
**Fig. 12.** Design cases for beams: а), б) – three-point bending; в), г) – four-point bending; д), е) – bending of a cantilever beam with rigid restraint