



*С.А. Соловьев,  
А.Д. Летавин,  
Ю.А. Губина,  
А.А. Соловьева,  
Л.С. Шевцов*

*Вологодский государственный  
университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО АРБОЛИТА И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

В статье исследуются прочностные характеристики арболита как конструкционного материала путем исследования и анализа запатентованных разработок. По результатам анализа нескольких десятков российских и зарубежных запатентованных решений смесей легких бетонов с органическим наполнителем установлено, что арболит как физико-механический материал может иметь прочность выше 5 МПа при различных видах составов и модификаторов. Следовательно, существует возможность его использования в качестве материала для несущих элементов строительных конструкций балочного типа (перемычки, ростверки, плиты перекрытий). Предложен вариант использования армированного арболита как материала для конструктивного решения энергоэффективной перемычки из легкого бетона. По результатам численного примера на базе классической теории железобетона установлена потенциальная несущая способность нормальных и наклонных сечений перемычки из армированного арболита при изгибе.

Арболит, прочность, предельное напряжение, легкий бетон, органические наполнители, патенты.

Научно-координационным советом по бетону и железобетону Госстроя СССР в «Координационный план основных научно-исследовательских работ» на 1986–1990 гг. была включена тема «Разработать, исследовать и внедрить эффективные конструкции из арболита прочностью до 5,0 МПа для зданий различного назначения». Однако, как отмечено в [1], «арболит остается малоизученным материалом. Введенные с определенной осторожностью в нормативные документы требования по проектированию и применению конструкций из арболита сдерживают разработку новых эффективных конструкций».

Арболит как строительный материал известен давно – материал и технологию изготовления изобрели в 30-е годы XX века под названием Durisol [2]. В России он получил распространение с 60-х годов прошлого века [3–5].

Арболит является одним из видов легких бетонов, которые производятся на органическом наполнителе (щепа, опилки). Основные правила производства, проектирования, транспортировки изделий из арболита приведены в Межгосударственном стандарте ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него». Прочность арболита по ГОСТ 19222-2019 невелика в сравнении с тяжелыми бетонами: расчетное сопротивление арболита при сжатии составляет от 0,3 до 2,1 МПа, при осевом растяжении от 0,087 до 0,570 МПа. На основе этих характеристик предлагается использовать арболит или в виде теплоизоляционных самонесущих элементов строительных конструкций, или в виде элементов кладки стен.

Исследование вопроса повышения прочностных свойств легких бетонов на органических наполнителях при минимизации их плотности и теплопроводности позволило бы разработать новые виды несущих элементов строительных конструкций, отличающихся энергоэффективностью, низким собственным весом, а также

позволит использовать отходы деревопереработки. В связи с этим в данной статье предлагается рассмотреть существующие виды высокопрочного легкого бетона на органических наполнителях, а также исследовать вопрос несущей способности изгибаемых элементов из армированного легкого бетона по типу арболита.

Преимуществом легких бетонов на основе органических наполнителей также является возможность использования древесных отходов и материалов деревопереработки в качестве наполнителя. Так, в исследовании [6] одного из самых известных ученых в данной области д-ра техн. наук профессора И.Х. Наназшвили отмечается, что «Древесная щепа-дробленка, получаемая из деревянных поддонов, бывших в употреблении и находившихся в длительной эксплуатации в разных температурно-влажностных условиях и не подвергнутых биологическому воздействию, в большей мере имеет стабилизированные свойства по деформативным показателям и химической активности. Дело в том, что многие легкогидролизуемые сахара и экстрактивные вещества, содержащиеся в древесине (сахароза, фруктоза, глюкоза, галактоза, арабиноза и др.), либо существенно снижены под воздействием влаги и солнечных лучей, либо видоизменены в более труднорастворимые формы, поэтому их влияние на процессы структурообразования и на замедление твердения цементного камня, а следовательно, и арболита, минимизировано».

На эффективность использования строительных материалов из продуктов деревопереработки указывают и авторы исследования [7], отмечая что «Повторное использование техногенных экологически чистых промышленных и бытовых отходов в строительстве позволяет улучшить условия проживания человека, уменьшить себестоимость продукции за счет повышения полезного выхода и снижения издержек на утилизацию отходов».

В работе [8] проведено исследование влияния фракционного состава древесного заполнителя на физико-механические показатели арболита.

В зарубежных исследованиях [9, 10] также отмечается актуальность использования отходов деревопереработки для использования в качестве крупного и мелкого заполнителя в легких бетонах. В исследовании [10] приведен большой обзор разработок составов бетонов на органических заполнителях из древесных отходов.

Современные методы и методики теплового контроля [11–14] могут быть использованы при дальнейшей оценке качества нового вида строительной про-

дукции из арболита в частности и легкого бетона на органическом заполнителе в целом.

Таким образом, исследование и разработка новых видов элементов строительных конструкций на основе высокопрочного арболита является актуальной задачей для строительной отрасли. В таблице 1 рассматриваются запатентованные способы получения сырьевой смеси арболита и технологических процессов ее изготовления и высучивания, которые позволяют получить арболит с прочностью выше 5 МПа.

В таблице 2 приведен обзор технических решений по производству и изготовлению блоков из арболита, конструкционная прочность которых не менее 5 МПа.

Таблица 1

**Анализ запатентованных составов арболитовых смесей по максимальной прочности**

Номер патента, год	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
SU 1477712, 1987	Мас., %: гипс 42–46, древесный заполнитель 25–27, измельченная в кислой среде костра льна 4–8, остальное – вода	8,70–10,20	Значительно возрастает сцепление камня вяжущего с заполнителем, что наряду с армирующим действием тонкоизмельченных волокон констры способствует значительному возрастанию прочности арболитовых изделий при изгибе и сжатии
SU 1574572 А1, 1987	Мас., ч.: древесный крупный заполнитель 220–250, древесный мелкий заполнитель 100–130, цемент 160–190, вода 80–95	5,70–12,80	В качестве древесного заполнителя используют гранулы, покрытые полимерным связующим, получаемые путем прессования при давлении 25–75 МПа и температуре 150–180 °С, причем для крупного заполнителя используют станочную стружку и опилки в соотношении 3:2, а для мелкого – опилки
RU 2620696 С1, 2016	Мас., %: древесный заполнитель 52–58; цемент 23–27; гипс 0,5–0,9; указанный лигносульфонат 0,45–0,75; хлористый кальций 0,75–1,65; вода 16–19	6,96	Обработка древесного заполнителя осуществляется в 4%-ном растворе гидроксида натрия при температуре 50–60 °С и одновременном ультразвуковом воздействии частотой 30–40 кГц в течение 20–30 мин, далее после слива раствора NaOH осуществляется промывка древесного заполнителя водой
RU 2338715 С1, 2008	Мас., ч.: указанная кора 1,0, указанное жидкое стекло ( $n=4$ ) 0,25, указанная зола-унос 2,1–2,2, указанное жидкое стекло ( $n=1$ ) 1,9–2,0	6,50–7,10	Кора обрабатывается жидким стеклом из микрокремнезема, содержащего до 17 % примесей в форме графита и карбида кремния. Уплотнение смеси вибрированием с пригрузом ( $P=0,05$ кгс/см <sup>2</sup> )
RU 2130911 С1, 1997	Мас., %: Опилки – золаунос – жидкое стекло = 14,6 – 15:34,3 – 35:51,1	7,90–11,60	Отходы древесины лиственницы в виде опилок подвергают водотепловой обработке – экстракции при температуре 100 °С в течение 1 ч, перемешивают последовательно с компонентами вяжущего – золой-уносом, а затем с углеродсодержащим жидким стеклом до однородного состояния, после чего изделия формируют послойным вибропрессованием
SU 1724622 А1, 1990	Способ предусматривает обработку высушенных опилок 2/3 ч. 30%-го водного раствора технических лигносульфонатов и затем портландцементом, смешивают 3-полугидрат сульфата кальция, песок и оставшуюся 1/3 ч. указанных технических лигносульфонатов. В полученную смесь вводят обработанные опилки	6,40–7,40	Высушенные до постоянного веса и отдозированные опилки засыпают в смеситель, в последний вводят 30%-ный раствор лигносульфонатов, например (СДБ), перемешивают 3–4 мин, затем в обработанные опилки в работающий смеситель вводят портландцемент, где перемешивание длится 2–3 мин, потом вводят в смесь, параллельно приготовленную в другом бетоносмесителе, полугидрат сульфата кальция, песок и воду, предварительно перемешанную с остальной частью лигносульфонатов, и перемешивают в течение 3–4 мин и, наконец, вводят обработанные лигносульфонатами и цементом опилки и перемешивают 3 мин

Номер патента, год	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
RU 2695313 C1, 2018	Мас., %: модифицированный цитрогипс 80,18–82,80; древесные опилки 2,30–4,58; вода – остальное	20,22–23,56	Смешивание древесных опилок с водой, введение модифицированного цитрогипса, перемешивание до равномерного его распределения на поверхности опилок; формование осуществляется в пресс-формах под давлением 20 МПа
SU 1699976 A1, 1989	Мас., %: цемент 38,1–46,7; дробленая обработанная древесина 18,3–22,8; подвспененный полистирольный песок крупностью 3 мм 0,85–2,6; древесная омыленная смола 0,19–0,23; остальное – вода	3,7–5,5	С целью снижения отпускной влажности, теплопроводности арболита, повышения прочности, морозостойкости дробленую древесину перед смешиванием с компонентами сырьевой смеси обрабатывают вязкой пеной, состоящей из водных растворов гидроксида кальция, сернистого алюминия и древесной омыленной смолы
SU 1294779 A1, 1987	Мас., %: опилки 60; шлак 28; щелочь 6; ТЭАТ-1 2; ТЛС 2; сульфат хрома (III) 2. На 1 мас.ч. суммы компонентов 1 мас.ч. воды	10,4	С целью снижения плотности и повышения прочности дополнительно содержит смесь триэтаноламинтитана, технического лигносульфоната и сульфат трехвалентного хрома
SU 1671638 A1, 1989	Мас.%: цемент 41,5; древесный наполнитель 18,3; пеностекло 9,1; вода 31,1	4,90–6,85	С целью повышения прочности и снижения отпускной влажности при изготовлении арболитовых изделий в арболитовую смесь вводят пеностекло
SU 1694528 A1, 1989	Мас., %: сланцевая зола 41,6–43; древесный наполнитель 8,5–9,4; карбонатная опока 13,9–14,3; хлорид кальция 0,57–0,86; активизатор твердения – отработанный раствор дубления мехов 0,44–0,63; остальное – вода	16,30–20,08	Мелкие карбонатные частицы служат как центры кристаллизации при твердении смеси, что сказывается на увеличении количества низкоосновных гидросиликатов, повышающих прочность строительных изделий

Таблица 2

## Анализ запатентованных составов арболитовых смесей по максимальной прочности

Номер патента, год, страна	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
KR20080106508A, 2007, Южная Корея	Мас. %: цемент 35; щепа 18; этиленвинилацетат 8; гидроксипропилметил-целлюлоза 1; остальное – вода	6–20	Продукты пиломатериалов могут иметь средний размер частиц в диапазоне от 1000 микрон или менее до 20–30 мм
CN104386989A, 2014, Китай	Мас. %: мелкий наполнитель 70, крупный наполнитель 10, силикатный цемент 5,6, алюмосульфатный цемент 4,4, вода 2,97, жидкое стекло 4, алебастр 2, полипропиленовое волокно 1, тропамин 0,03	19,3	В состав элемента входит наполнитель из строительных отходов, после дробления подвергается трехкратному отбору путем просеивания, отбирается древесная щепа и органические отходы. Вибрационное просеивающее устройство, имеющее сита размером 400 мкм, разделяет элементы на мелкий и крупный наполнитель
WO2004099102A2, 2003, WIPO	Сухая часть (смесь): - оксид магния (каустический магnezит) в количестве от 25 до 60; - Органические отходы 40–75. - Красители – от 0 до 5.  Жидкая часть: - Водный раствор MgCl <sub>2</sub> с концентрацией 18–32°Be, количество от 70 до 100 % от количества MgO. Добавки: - MgSO <sub>4</sub> в качестве добавки к водному раствору MgCl <sub>2</sub> – до 5 % от количества MgCl <sub>2</sub> ; - гипс – до 10 % от количества MgO.	3–10	Варьируя тип и количество наполнителей (натуральная глина, вспученное вулканическое стекло, керамзит, зола от теплоэлектростанций, целлюлозные волокна, древесная стружка, древесная мука, измельченная древесная кора, волокна пальм, рисовая шелуха, шелуха подсолнечника, хлопковое семя, отходы производства гибких и конопляных волокон, хрупкие, нарезанные) и связующего, в вышеупомянутых пределах можно получить различные группы марок блоков

Номер патента, год, страна	Состав арболитовой или опилко-бетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
CN1254457C, 2006, Китай	Мас. % от веса брутто сырья: композитные цементирующие материалы 20~70; мелкий песок 22,5~50; легкий каркасный материал 10~40; волокно 0,5~2. Мас. % от веса композитных цементирующих материалов: материал, образующий поры, 0,1~3; пластификатор 0,2~2,5; едкая щелочь 0,2~3; вода 15~30	15~30	Размеры щепы 1–5 мм
CN101298379B, 2011, Китай	Дозирующее сырье: 12 килограммов резиновых зерен, 18 килограммов древесной шерсти, 42 килограмма цемента, 0,36 килограмма полимерного полиизоцианата, 0,5 килограмма органического армирующего ПК, 1,5 килограмма жидкого стекла, 14 килограммов в воде, концентрация составляет 2 %-ный водный раствор гидроксида натрия	3–6,6	Размеры щепы: длина 2 мм~15 мм, ширина 0,2~20 мм, толщина 0,2~2,0 мм. Щепы пропитывается в 2%-ом водном растворе гидроксида натрия в течение 5 часов, после чего высушивается до влажности ~7 %.

Как видно из таблиц 1 и 2, использование специальных химических добавок, специальных типов связующих, а также вариация и модификация органического заполнителя позволяют создать легкие бетоны на органическом заполнителе с прочностью от 5 до 30 МПа.

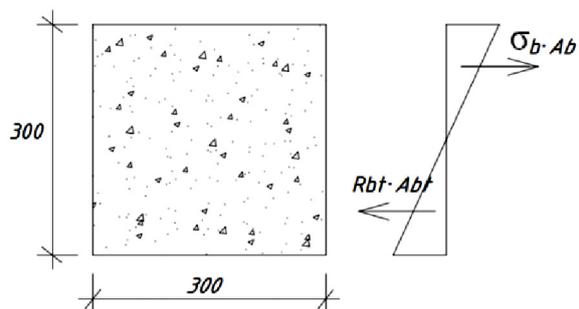


Рис. 1. Нормальное сечение и эпюры напряжений перемычки без арматуры

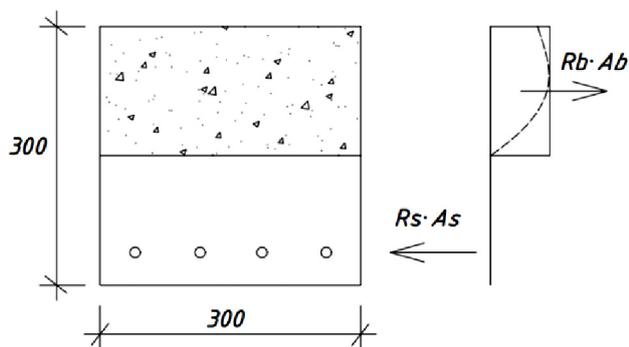


Рис. 2. Нормальное сечение и эпюры напряжений перемычки с арматурой

Как видно на рисунке 1, в неармированном изгибаемом элементе из арболита определяющим фактором при разрушении является достижение критических напряжений в растянутой зоне  $R_{bt}$ . Напряжения в сжатой зоне бетона  $\sigma_b$  не достигают критических зна-

чений. При добавлении в исследуемый элемент арматурных стержней с общей площадью  $A_s$  расчетная схема для определения прочности нормальных сечений меняется (рис. 2).

В армированном элементе не учитывается работа растянутой зоны бетона (в запас надежности). Растягивающие усилия воспринимает арматура, сжимающие усилия воспринимаются площадью сжатой зоны бетона  $A_b = b \cdot x$ . В первом приближении можно принять классическую модель теории предельного сопротивления железобетона, когда напряжения распределяются равномерно по сжатой зоне при достижении предельного состояния. В дальнейшем данную функцию необходимо уточнить по результатам испытаний образцов выбранного типа арболита на сжатие с построением диаграмм деформирования. Вид данной функции будет нелинейный, как показано на рисунке 2.

Рассмотрим числовой пример. Пусть имеется изгибаемый элемент из армированного легкого бетона с органическим заполнителем. Размеры поперечного сечения элемента 300x300 мм, пролет 2500 мм. По результатам испытаний образцов легкого бетона на сжатие и растяжение установлены следующие характеристики: расчетное сопротивление сжатию  $R_b = 5,00$  МПа; расчетное сопротивление растяжению  $R_{bt} = 1,00$  МПа.

Случай 1. Напряжения в нормальном сечении достигнут предельных значений при величине изгибающего момента:

$$M_{ult} = R_{bt} W = R_{bt} \frac{bh^2}{6} \rightarrow 4,50 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

В данном случае элемент выдерживает 720 кг нагрузки, сосредоточенной в середине пролета или распределенную нагрузку 576 кг/м.

Случай 2. Пусть элемент армируется 4 стержнями арматуры А400 диаметром 12 мм. Площадь армирования составит  $A_s = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Расчетное сопротивление арматуры, в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бе-

тонные и железобетонные конструкции», составит  $R_s=350$  МПа. По модели прочности нормальных сечений железобетонных элементов можно записать:

$$M_{ult} = R_s A_s \left( h_0 - \frac{R_s A_s}{2 R_b b} \right) \rightarrow 30,00 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

где  $h_0$  – рабочая высота сечения элемента, принятая 0,28 м.

Как видно из расчета, предельный изгибающий момент, который может воспринять сечение, вырастает более чем в 6 раз. В данном случае элемент выдерживает 4800 кг нагрузки, сосредоточенной в середине пролета, или распределенную нагрузку 3840 кг/м.

Поперечная сила, воспринимаемая арболитом в наклонном поперечном сечении:

$$Q_{ult} = 0,5 R_{bt} b h_0 \rightarrow 42 \text{ кН},$$

что соответствует равномерно распределенной нагрузке 5600 кг/м для рассматриваемой конструкции.

Сохранность арматуры в теле легкого бетона на органическом заполнителе подтверждается экспериментальными исследованиями [1], где отмечается, что «хранение балочных образцов с преднапряженной арматурой в течение шести лет при влажности 63–77 % и температуре 15–25 °С показало хорошие защитные свойства поризованного арболита класса В5 и возможности сохранения требуемых свойств конструкции на весь период эксплуатации зданий».

В то же время железобетон имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 1,69$  Вт/(м·°С) в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», а арболит самой высокой плотности D800 имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,24$  Вт/(м·°С) в соответствии с ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него».

Вышеизложенное расчетное обоснование отражает возможность создания энергоэффективных конструкций из армированного арболита.

В исследовании выполнен научно-технический обзор запатентованных разработок по составу и технологии изготовления легких бетонов на органических заполнителях (в частности, арболита), прочность при сжатии которых превышает значение 5 МПа.

Предложен вариант энергоэффективной перемычки из армированного арболита с предварительным расчетным обоснованием несущей способности нормальных и наклонных сечений.

Для более точных и достоверных математических моделей определения несущей способности таких конструкций необходимо проведение экспериментальных исследований с введением в уравнение факторов особенностей работы армированного арболита под нагрузкой.

### Литература

1. Обрезкова, В. А. Исследование изгибаемых предварительно напряженных конструкций из поризованного арболита : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Обрезкова. – Самара : СГАСУ, 2005. – 20 с.

2. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Р. Г. Сафин, В. В. Степанов, Э. Р. Хайруллина, А. А. Гайнуллина, Т. О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №. 20. – С. 123–128.

3. Первовский, А. Н. Арболит в строительстве / А. Н. Первовский. – Москва : Московский рабочий, 1964. – 131 с.

4. Авторское свидетельство № 250718 А1 СССР, МПК С04В 18/26, С04В 28/04. Арболит : № 1178681/29-33 : заявл. 04.08.1967 : опубл. 12.08.1969 / Г. А. Бужевич, И. П. Мещерякова, А. С. Щербаков ; заявитель Научно-исследовательский институт бетона и железобетона.

5. Пискарева, Л. Н. Арболит из отходов лесозаготовительной промышленности Сибири / Л. Н. Пискарева // Местные строительные материалы : сборник. – Красноярск : КПИ, 1970. – С. 45–67.

6. Наназашвили, И. Х. Древесные отходы – вторая жизнь. Арболитовые стеновые блоки / И. Х. Наназашвили, А. А. Соколов, Р. А. Марченков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 7 (150). – С. 24–25.

7. Лукаш, А. А. Эффективные строительные материалы и изделия из техногенных отходов для жилищного строительства / А. А. Лукаш, Н. П. Лукутцова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 26–37.

8. Влияние фракционного состава древесного заполнителя на физико-механические показатели арболита / В. П. Сеничев, Л. М. Воропай, Ю. Р. Осипов, С. А. Шлыков // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 6 (67). – С. 47–50.

9. Chowdhury, S. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview / S. Chowdhury, M. Mishra, O. M. Suganya // Ain Shams Engineering Journal. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – Pp. 429–437.

10. Kasun Uthpala De Silva L.V. Light weight concrete using waste wood chips as a partial replacement. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/343961794\\_LIGHT\\_WEIGHT\\_CONCRETE\\_USING\\_WASTE\\_WOOD\\_CHIPS\\_AS\\_A\\_PARTIAL\\_REPLACEMENT](https://www.researchgate.net/publication/343961794_LIGHT_WEIGHT_CONCRETE_USING_WASTE_WOOD_CHIPS_AS_A_PARTIAL_REPLACEMENT) (Дата обращения: 1.11.2021). – Текст: электронный.

11. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Сеницын [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 147–155.

12. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Сеницын // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 2 (124). – С. 29–33.

13. Карпов, Д. Ф. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов // Вестник Дагестанского государственного технического

го университета. Технические науки. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 92–102.

14. Павлов, М. В. Современные теплоизоляционные материалы для повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и энерго-

эффективности инженерных систем / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. П. Березина // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. – 2020. – № 1. – С. 81–87.

*S.A. Solovyev, A.D. Letavin, Yu.A. Gubina, A.A. Solovyeva, L.S. Shevtsov*  
*Vologda State University*

#### **RESEARCH OF HIGH-STRENGTH ARBOLITE MIXTURES AND STRUCTURAL SOLUTIONS ON THEIR BASIS**

The article describes the strength characteristics of arbolite as a high-strength lightweight concrete with wood chips. According to the results of the analysis of several dozen Russian and foreign patented solutions for mixtures of lightweight concrete with organic aggregate, it was found that arbolite as a mechanical material can have a compressive strength above 5 MPa with various types of mixtures and modifiers. Therefore, it is possible to use it as a material for beam-type load-bearing structural elements (beams, slabs, lintels, etc.). A variant of using reinforced arbolite as a material for a structural solution of an energy-efficient lintel made of lightweight concrete is proposed. Based on the results of a numerical example by the classical theory of reinforced concrete, the potential bearing capacity of normal cross-sections and shear capacity have been established for the flexural reinforced arbolite lintel.

Arbolite, compressive strength, ultimate stress, lightweight concrete, organic aggregates, patents.