

### Список цитированных источников

1. Конструкции большепролётных зданий и сооружений. Правила эксплуатации: СП 304.1325800.2017 Введ. 2018-04-26. – М.: АО ЦНИИ Промзданий, 2017. – 56 с.
2. Артебякина, Г.И. Обзор конструктивных решений арочных покрытий для общественных зданий / Г.И. Артебякина, В.А. Щербина // Молодой ученый. – 2017. – № 6. – С. 29-31.
3. Кашеварова, Г.Г. Экспериментально-теоретические исследования устойчивости и верификация расчётных моделей большепролётных деревянных арок / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, И.Н. Фаизов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 83-90.
4. Деревянные конструкции: СП 64.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Введ. 2011-05-20. – М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2011. – 76 с.
5. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986.
6. Серов, Е.Н. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития / Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин // ИВУЗ. «Лесной журнал». – 2013. – № 2.
7. Кашеварова, Г.Г. Исследование устойчивости клееных деревянных большепролётных арок / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, И.Н. Фаизов // Вестник ПНИПУ. – 2010. – № 1. – С. 22-31.
8. Рощина, С.И. Армирование – эффективное средство повышения надёжности и долговечности деревянных конструкций / С.И. Рощина // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2008. – № 2. – С. 71-74.
9. Окольников, Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольников, С.В. Герасимов // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С.14-21.
10. Иномназаров Т.С. Применение композитной арматуры / Т. С. Иномназаров, А.М. Аль Сабри Сахар, М.Х. Дирие // Системные технологии. – 2018. – № 27. – С. 24-28.
11. Рощина, С.И. Армированные деревянные конструкции / С.И. Рощина, М.С. Сергеев, А.В. Лукина // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2013. – № 4. – С. 80-85.
12. Гранкин, К.В. К расчёту сжато-изгибаемых клеелесных конструкций по деформированной схеме с помощью учёта геометрической нелинейности в комплексе SCAD Office 11.5 и Lira Soft 9.6 [Электронный ресурс] / К. В. Гранкин // Интернет-журнал «Наукосведение». – 2016. – № 4(8). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru> – (10.03.2019).
13. Устарханов, О.М. Схема армирования дощатоклееной балки стеклопластиковым прутком / О.М. Устарханов, Г.Г. Ирзаев // Современное строительство и архитектура. – 2018. – № 3 (11). – С. 16-20.

УДК 620.1:674.8

## ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОВОГО КОМПОЗИТНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНОЙ ПЛИТЫ И УГЛЕВОЛОКНА

Шалобыта Н. Н., Шалобыта Т. П., Лазарук А. А

**Введение.** В настоящее время численное моделирование становится неотъемлемой частью при разработке, совершенствовании и исследовании строительных конструкций. Достигнутый на данный момент уровень развития вычислительной техники, как по быстродействию, так и по объёму оперативной памяти, и одновременно с этим широкое внедрение многопроцессорных систем позволяют реализовывать более сложные нелинейные математические модели

строительных конструкций из различных материалов. Решение подобных задач в нелинейной постановке позволит в конечном итоге реализовать идею сокращения экспериментальных исследований математическим моделированием на ЭВМ. Наряду с этим в настоящее время изменились приоритеты исследования – главной задачей исследователя становится не получение любой ценой решения в виде аналитического выражения, а преобразование исходных уравнений (в том числе аналитическими методами) к виду, удобному для ЭВМ, и последующий машинный анализ, позволяющий получить максимум полезных свойств из моделируемой системы.

Вычислительный эксперимент во многом аналогичен натурному. Он также состоит из последовательного проведения этапов, таких как планирование экспериментов, создание экспериментальной установки, проведение испытаний, обработка экспериментальных данных, их интерпретация и т. д. Однако вычислительный эксперимент проводится не над реальным объектом, а над его математической моделью, и роль экспериментальной установки играет оснащенная специально разработанной программой ЭВМ.

Сравнивая численный и физический эксперименты, приходим к выводу, что физический значительно дороже. Численный эксперимент обладает типичной для теории степенью гибкости, которая состоит в способности оценить влияние различных факторов, не прибегая к существенным изменениям в вычислительной модели. В тех случаях, когда физическое явление недостаточно изучено или реальный эксперимент трудно осуществим, математическое моделирование остается практически единственным средством. И, наконец, численный эксперимент является более прозрачным. Экспериментальные установки, даже построенные по единой принципиальной схеме, непременно имеют конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности, которые в значительной степени определяют результаты опытов. Математические модели, алгоритмы и программы легко копируются, распространяются и воспроизводятся. Однако при проведении исследований важно помнить, что численный эксперимент имеет свои ограничения, которые могут привести к неэффективным затратам времени и ресурсов, или даже к получению ошибочных результатов. Применимость результатов вычислительного эксперимента ограничена рамками принятой математической модели. В действительности численный эксперимент не может полностью заменить натурный, и поэтому необходимо их разумное сочетание. Результаты натурального опыта являются фундаментом для построения теории, на основе которой создается математическая модель. Поэтому к результатам численного эксперимента необходимо подходить с известной осторожностью, особенно если в его основе лежит новая теория либо используемые параметры модели находятся на границе области ее применимости.

**Основная часть.** В настоящее время перспективы развития деревообрабатывающей промышленности связывают с разработкой и широким применением древесных композиционных материалов. Они имеют комплекс свойств и особенностей, отличающихся от традиционного конструкционного материала деревообработки (массивной натуральной древесины) и в совокупности открывают широкие возможности для разработки новых материалов и технологических процессов. В данной работе предлагается к рассмотрению новый композитный элемент на основе цементно-стружечной плиты и углепластика.

*Цементно-стружечные плиты (ЦСП)* – это новое поколение строительных материалов в виде монолитной композитной плиты толщиной от 10 до 36 мм с гладкой твердой поверхностью. ЦСП изготавливаются путем прессования отформованной смеси, состоящей из стружки древесины хвойных пород, портландцемента, минеральных веществ и воды. ЦСП обладают рядом неоспоримых преимуществ при использовании в сборных конструкциях [1], к которым предъявляются жесткие требования высокой прочности, влагоустойчивости, звуконепроницаемости, пожаробезопасности, экологичности и гигиенической безвредности, стойкости к воздействию атмосферной среды. В строительной отрасли цементно-стружечные плиты нашли применение в качестве панелей перегородок, элементов покрытий и подвесных потолков, вентиляционных коробов, полов, ограждений лоджий, а также подоконных досок, обшивок, облицовочных деталей и других строительных изделий. ЦСП могут быть использованы в жилых, общественных и зданиях промышленного и сельскохозяйственного назначения, а также временных постройках.

*Волокнисто-армированные полимеры (Fiber reinforced polymer - FRP)* представляют собой композит, состоящий из высокопрочных волокон и матрицы, он предназначен для связывания этих волокон при изготовлении структурных форм. Общие типы волокон включают арамид, углерод, стекло и высокопрочную сталь, а их матрицы – эпоксидные и сложные эфиры или неорганические матрицы для использования в огнестойких композитах. Системы FRP обладают значительными преимуществами по сравнению с классическими конструкционными материалами, такими как сталь, обладая малым весом, коррозионной стойкостью и т. д. К основным конструкционным преимуществам углеродных волокон относятся их исключительно высокие отношения сопротивления на растяжение к весу, а также высокие отношения модуля упругости к весу.

Как правило, в строительстве используются не отдельные нити углеволокна, а ткани на их основе. Ткань определяется как изготовленная сборка длинных волокон из углерода, арамида, стекла или других видов пластика, их комбинаций для получения плоского листа из одного или нескольких слоев волокон. Эти слои удерживаются вместе либо путем механической взаимоблокировки самих волокон, либо с помощью вторичного материала, чтобы связать эти волокна вместе и удерживать их в определенном фиксированном положении, предоставляя сборке достаточную целостность для обработки. Во многих случаях тканевые композиты FRP укладываются на конструкцию вручную с использованием техники ручной пропитки, также называемой ручной укладкой. Этот метод стал обычным явлением во всей индустрии композитов по ряду причин. Во-первых, принципы этой методики просты в обучении и широко используются в течение многих лет. Во-вторых, этот метод очень экономичен, поскольку дорогостоящее оборудование не требуется. Наконец, широкий ассортимент волокон и смол совместим с этим методом и может быть приобретен у большого количества поставщиков.

Одним из перспективных вариантов применения цементно-стружечных плит является использование их в качестве элементов монолитных перекрытий, а именно несъемной (оставляемой) опалубки. Набирающая известность в Европе «VST-systema» австрийской фирмы VST BUILDING TECHNOLOGIES AG [2], в

основе технологии которой лежит применение в качестве элементов опалубки листов цементно-стружечных плит. Для Республики Беларусь ЦСП-технология является относительно новой, несмотря на то, что она дает возможность снизить себестоимость строительства, сократить его сроки и повысить качество зданий.

Запатентованная VST-система – это система несъемной опалубки, состоящая из цементно-стружечных плит толщиной 24 мм, соединенных в заводских или построечных условиях в готовые армированные элементы. Для соединения элементов опалубки применяются запатентованные арматурные блоки, состоящие из стальных П-образных профилей, расположенных с определенным шагом и приваренных к ним арматурным стержням диаметром не менее 10 мм. Впоследствии арматурные блоки закрепляются на листы несъемной опалубки из ЦСП стальными шурупами. В дальнейшем из отдельных элементов возводятся перекрытия (стены) с соединением отдельных листов в узлы обычно на строительной площадке, армируются и затем заливаются бетонной смесью [3]. Несмотря на имеющиеся преимущества системы, она имеет ряд технологических недостатков (трудоемкость процессов возведения) и конструктивных – обеспечение целостности работы конструкции перекрытий зданий (требования по пригодности к нормальной эксплуатации – SLS).

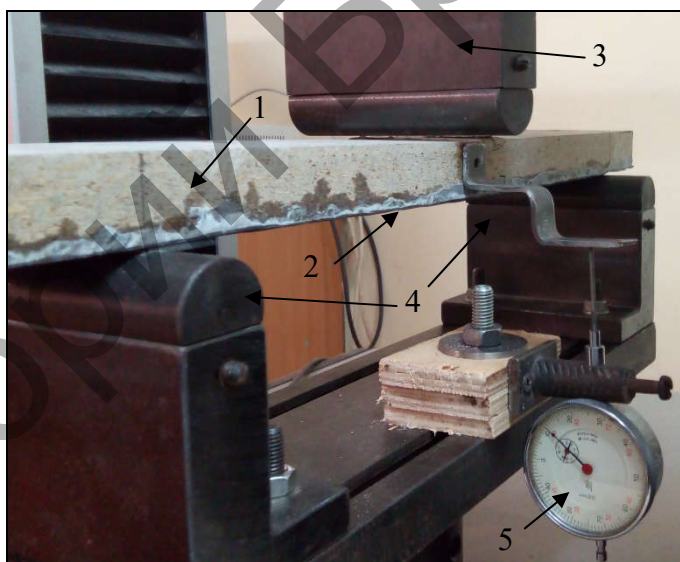
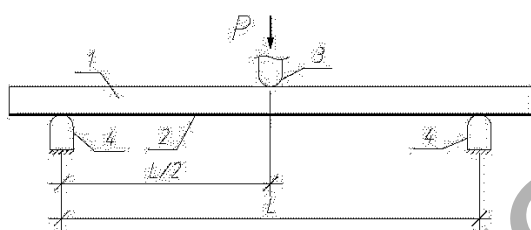


*Рисунок 1 – Применение VST-системы перекрытий зданий*

Согласно разработанной VST BUILDING TECHNOLOGIES AG технологии соединение отдельных листов ЦСП-опалубки как по длине, так и по ширине перекрытий выполняется с применением дополнительных металлических элементов (уголков) на механических связях [4], не предусматривающих передачу усилий между листами опалубки. В связи с вышеотмеченным при проектировании перекрытий совместную работу ЦСП и монолитного бетона рекомендуется не учитывать [4]. Однако, как показывают собственные экспериментальные исследования [3, 5, 6], один из важных установленных эффектов – совместная работа двух материалов, поэтому целостность в работе непосредственно несъемной опалубки является одним из важных условий при проектировании данных перекрытий. Для качественной передачи усилий при работе листов несъемной опалубки из ЦСП предлагается решение с использованием в зоне их стыка ламелей из углеволокна.

Теоретическая оценка работы под нагрузкой железобетонной монолитной плиты с несъемной опалубкой из предлагаемой композитной конструкции предполагает наличие прочностных и деформационных характеристик данного материала, что требует проведения комплекса экспериментальных исследований. Численное моделирование нового материала конструкции в виде конечно-элементного объекта позволит существенно сократить продолжительность исследований, однако потребует верификации принятой модели на основе экспериментальных данных, но уже с меньшими затратами материальных ресурсов.

Для оценки прочностных и деформационных характеристик комплексного строительного материала, состоящего из листа ЦСП и наклеенной на него ламели из углеволокна, выполнялись численные и экспериментальные исследования изгибаемых балочных элементов с размерами поперечного сечения ( $b \times h$ ) 75 x 25 мм, длиной 450 мм (толщина слоя углеволокна на сложном клее с использованием в том числе эпоксидных смол – 2 мм). Схема, принятая для численно-экспериментального исследования, изображена на рисунке 2.



1 – ЦСП, 2 – углеволокно, 3 – нагружающий элемент [7],  
4 – опорные элементы [7], 5 – индикатор часового типа

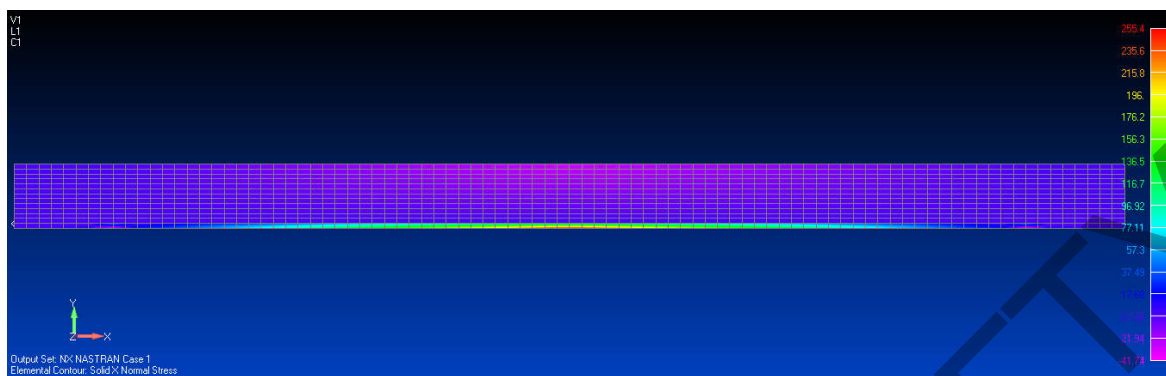
**Рисунок 2 – Схема численно-экспериментального исследования**

В качестве численного метода решения поставленной задачи использовалось конечно-элементное моделирование с применением вычислительных пакетов «NX Nastran» [9] и ПК «ЛИРА-САПР2017» [10]. При моделировании объемной модели и исследовании её напряженно-деформированного состояния применялось допущение в виде жесткого сопряжения углеволокна с ЦСП.

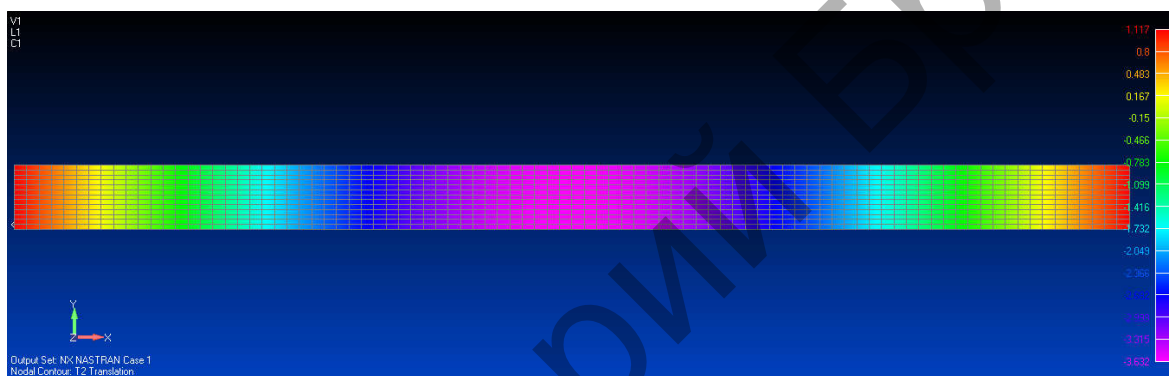
Для построения конечно-элементной трехмерной модели в **NX Nastran** было применено твердотельное моделирование с использованием КЭ «Solid» (рисунок 3). Разбивка производилась с использованием твердотельных пространственных шестигранных элементов «Solid» типа «Brick» («Брусоч»). Толщина принятых КЭ – 2 мм, что позволило разбить толщину композита на 13 равных частей (при толщине ЦСП 24 мм и углеволокна 2 мм). В горизонтальной плоскости размеры по двум осям приняты по 5 мм. Прочностные и деформационные



характеристики отдельно каждого из материалов (ЦСП и углеволокна) задавались на основании данных, полученных по результатам их испытаний в соответствии с требованиями [7].

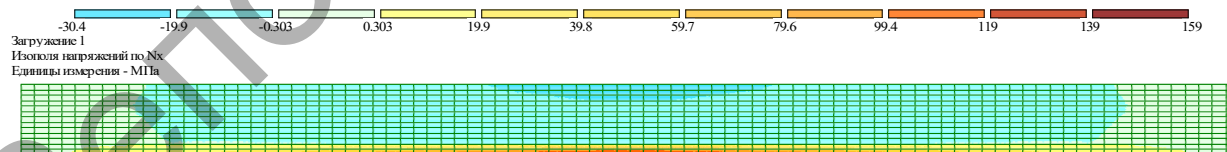


*Рисунок 3 – Изменение изополей напряжений по высоте сечения композитного элемента в NX Nastran*

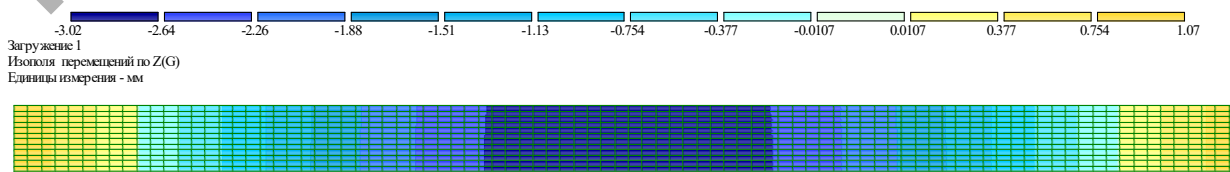


*Рисунок 4 – Изменение изополей перемещений в направлении вертикальной оси Y в NX Nastran*

Объемное моделирование трехмерной модели в ПК ЛИРА-САПР было построено с применением конечного элемента «Тип 36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ». Разбиение сетки конечных элементов выполнено аналогично Nastran, т. е. в вертикальной плоскости 2 мм, и в горизонтальной по 5 мм.



*Рисунок 5 – Изменение изополей напряжений по высоте сечения композитного элемента в ПК ЛИРА-САПР*



*Рисунок 6 – Изменение изополей перемещений в направлении вертикальной оси Z в ПК ЛИРА-САПР*

Верификация результатов численного и натурального экспериментов проводилась по значениям прочностных характеристик в характерных сечениях элемента и по величине вертикальных перемещений (прогиба) в тех же сечениях. В таблице 1 приведены данные сравнения численных и экспериментальных результатов при одинаковой величине прикладываемой нагрузки.

Таблица 1 – Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований при нагрузке соответствующей трещинообразованию в ЦСП

Показатель	Эксперимент	NX Nastran	ПК ЛИРА-САПР
Напряжения в FRP $\sigma_x$ , МПа	170	168	159
Прогиб, мм	5.35	3.62	3.02

Анализ полученных результатов, оформленных в виде обобщенных теоретико-экспериментальных характеристик, показал, что расхождение значений теоретических и экспериментальных данных по напряжениям находится в пределах 5-7%, по деформациям прогиба – до 35%. Таким образом, разработанная математическая модель практически в полной мере адекватна реальной работе комплексного материала. Из полученных данных можно установить, что разработанная математическая модель соответствует необходимому уровню точности для определения прочностных и деформационных характеристик с целью предконструкторского проектирования конструкции.

#### **ВЫВОДЫ:**

1. Цементно-стружечная плита обладает рядом неоспоримых преимуществ при использовании в строительных конструкциях. С целью расширения области применения плит было предложено новое конструктивное решение для эффективного использования ЦСП в качестве несъемной опалубки в железобетонных конструкциях, а именно с внедрением в ЦСП усиления на основе углеволокна.

2. Разработанная математическая модель по результатам верификации с проведенным физическим экспериментом является адекватной, что говорит о возможности дальнейшего применения результатов этой модели при проведении исследований.

3. Анализ полученных изополей распределения напряжений и перемещений, построенных по результатам численных расчетов и экспериментальных исследований, наглядно демонстрируют достоверность созданной компьютерной модели, что позволяет ее использовать для дальнейших исследований.

#### **Список цитированных источников**

1. Цементно-стружечные плиты (ЦСП) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stroytrest8.by/articles/403-dsp.html>. – Дата доступа: 21.04.2018.
2. Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Брест, 2012. – Режим доступа: [www.vst-austria.at](http://www.vst-austria.at). – Дата доступа: 21.08.2012.
3. Шалобыта, Н.Н. Экспериментальное исследование деформированного состояния плоского многопустотного железобетонно перекрытия с применением элементов системы VST. / Н.Н. Шалобыта, Е.А. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 1(85): Строительство и архитектура. – С. 97–102.
4. VST SYSTEM MANUAL. VST Verbundschalungstechnik GmbH Wildgansgasse 1b/2 A 2332 Hengersdorf – Vienna, 223 p.

5. Шалобыта, Н.Н. Исследование прочностных и деформативных параметров контактных соединений монолитных конструкций с несъемной опалубкой из ЦСП / Н.Н. Шалобыта, Т.П. Шалобыта, Е.А. Деркач, Ю.Н. Науменко // Вестник БрГТУ. – 2016. – №1(97): Строительство и архитектура. – С. 81-86.

6. Экспериментальное определение параметров контакта в монолитных конструкциях с включением в работу несъемной опалубки из цементно-стружечной плиты / Н.Н. Шалобыта, Т.П. Шалобыта, Е.А. Деркач, Ю.Н. Науменко // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. – 2016. – Т.6. №1: Тэхніка. – С. 58-66.

7. Плиты цементно-стружечные. Технические условия: ГОСТ 26816-2016. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15с.

8. MAPEWRAP C UNI-AX [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mapei.com/RU-RU/Продукты-для-структурного-усиления/Усиление-сборных-промышленных-зданий/MAPEWRAP-C-UNI-AX>. – Дата доступа: 10.03.2019.

9. NX Nastran [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simcenter/simcenter-nastran.html>. – Дата доступа: 10.03.2019.

10. Проектирование и расчет строительных конструкций: ПК ЛИРА-САПР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liraland.ru/lira>. – Дата доступа: 10.03.2019.