

концентраций напряжений в месте расположения ТД 21 не наблюдались.

По результатам испытаний видно, что на протяжении всего эксперимента, практически во всех исследуемых точках монотонно увеличивались напряжения сжатия.

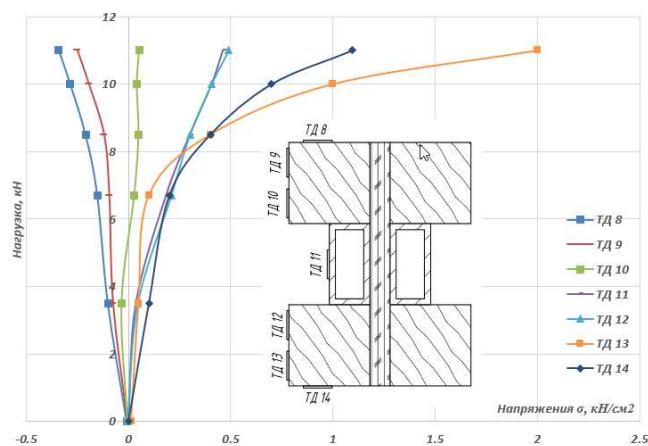


Рисунок 9 – График зависимости нормальных напряжений от нагрузки в узле 1, тензодатчики 8–14

Разница между значениями прогибов, определенных по программе ANSYS при действии расчетной нагрузки, и значениями прогибов, полученных в ходе экспериментальных исследований, составляла не более 28% с учетом введения в результаты численных расчетов фактического модуля упругости древесины и 41% при использовании табличных характеристик. Расчет в ПК ЛИРА-САПР показал большие прогибы, а, следовательно, более близкие к эксперименту результаты. Т. о., если не учитывать при расчете деформативности конструкции жестких металлических вставок – стальных труб получается более реальная картина деформаций. Деформации, полученные по данным численных исследований в ПК ANSYS, имели меньшее значение.

Так же экспериментальные прогибы в четвертях конструкции больше, чем в расчете, что указывает на недостаточное натяжение или большую деформативность затяжки.

Близкого к экспериментальным данным результата расчета в ПК ANSYS можно добиться, решая контактную задачу, когда стальная труба прикреплена к стенке и полкам двутавра при помощи болтов. В настоящем исследовании между элементами был выбран контакт bonded, что обеспечивает жесткое соединение элементов по всем соприкасающимся поверхностям. Вследствие чего напряжения в

стенке по экспериментальным данным (достигающие  $0,2 \text{ кН/см}^2$ ) ниже полученных численным методом (до  $0,35 \text{ кН/см}^2$ ) на 32% – 70%. Напряжения в верхней полке узла 1 по результатам эксперимента (до  $0,33 \text{ кН/см}^2$ ) также были ниже чем полученные численным методом (до  $0,38 \text{ кН/см}^2$ ) на 13%.

В узле 2 разница напряжений в верхней полке по экспериментальным и численным методам достигает 64,8%. Причиной послужили местные напряжения сжатия. Для уменьшения напряжений в верхней полке модели был увеличен зазор между верхними полками смежных элементов, после чего напряжения в верхней полке составили  $0,62 \text{ кН/см}^2$ , что на 11% меньше расчетных величин.

#### Заключение

1. Результаты изготовления опытных полигональных конструкций с размерами в плане  $3,0 \times 1,0 \text{ м}$  свидетельствуют о высокотехнологичности, а также о возможности производства таких конструкций на действующих заводах КДК.
2. Критические напряжения, определенные численным методом, отличаются от экспериментальных значений на 12%. Расхождение объясняется тем, что в численной модели не учитывалась величина податливости соединения, т. е. соединение деревянных элементов со стальными элементами принималось жестким и они закреплялись в двух плоскостях.
3. Расчет конструкции с узлами с металлическими трубами требует дополнительных исследований в области контакта узловых элементов для определения деформаций конструкции.
4. Отсутствие зазоров между торцами соединяемых элементов, определенных из диаграммы податливости для данного вида соединения двутавровых деревянных балок, может привести к изменению статической работы элементов конструкции и распределению напряжений как в самих элементах, так и в узловых соединениях.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование деревянных полигональных сводчатых покрытий / А. В. Бойко, В. В. Стоянов, А. О. Бояджи [та ін.] // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2017. – №174. – С. 27–32.
2. ДБН В.2.6-161:2017 / ТОВ Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 117 с.
3. Серов Е. Н. Проектирование деревянных конструкций : учебное пособие / Е. Н. Серов, Ю. Д. Санников, А. Е. Серов. – Москва, 2011. – 534 с.
4. Золотухин, Ю. Д. Испытание строительных конструкций. – М. : Выс. шк., 1983.
5. Стоянов, В. В. Конструкции из дерева и пластмасс : курс лекций / Владимир Стоянов. – О.: ВРС, 2005.

Материал поступил в редакцию 10.04.2018

#### STOYANOV V. V., BOIKO O. V. Experimental investigations of polygonal plane arctic construction with nodes using steel pipes

The article investigates the stress-strain state of a polygonal flat arch construction of wooden I-beams using steel pipes for joining. Analytical and numerical calculations of the models were performed, according to the results of which the most interesting ones for the experimental study were selected. An experimental study was carried out with the determination of surface stresses by the electric tensometric method and the determination of deflections until complete destruction of the structure under the action of a concentrated load in the middle of the span. Special attention was paid to the analysis of the work of the node variant proposed earlier by the authors and used in the design under study. The analysis of the results of numerical and experimental studies.

УДК 691.32 (043.3)

Павлова И. П.

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА БЕТОНА

**Введение.** На сегодняшний день составы всех бетонных смесей, подбираемых и выпускаемых рядом заводов-изготовителей, должны обеспечивать ряд характеристик в соответствии с СТБ

EN 206 [1] и со спецификацией.

Таким образом, бетон, полученный в результате затвердевания бетонной смеси, изготовленной в строго контролируемых условиях,

Павлова Инесса Павловна, к. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

должен иметь стабильный неизменный состав. Однако в практике современного строительства, к сожалению, не редки случаи ярко выраженных дефектов строительных конструкций, связанных с нарушением характеристик бетонной смеси и, как следствие, бетона.

При возникновении таких спорных ситуаций в строительстве чаще всего проводится обследование строительных конструкций. В результате данных мероприятий устанавливается, в основном, только фактическая прочность бетона и на основании этих данных решаются спорные вопросы о качестве выполнения строительных работ. Наличие только физико-механических параметров в подавляющем большинстве случаев недостаточно для получения объективной информации о качестве бетона.

Таким образом, разработка данной методики определения вещественного состава является актуальным направлением работ, целью которых является получение дополнительной информации о качестве бетона, применяемого при строительстве различных объектов.

До настоящего времени все предлагаемые методики определения вещественного состава бетона базировались исключительно на методах химического анализа [2,3]. Так, для определения содержания цемента в пробах бетона предлагаются два метода:

- метод непосредственного определения содержания цемента (химический метод);
- метод определения содержания цемента по разности между массой исследуемой пробы и массой заполнителей (ситовой метод).

**Метод с непосредственным определением содержания цемента** состоит из следующих операций:

- определение количества крупного заполнителя;
- определение количества цемента с помощью химического анализа;
- определение количества мелкого заполнителя (песка) – по разности.

Количество крупного заполнителя определяется путем термического разложения бетона и отсеивания распавшейся массы через сито с размером ячейки 5 мм.

Количество цемента определяется путем растворения фракций, прошедшей через сито 5 мм (растворной части), в соляной кислоте, а затем в щелочи (для растворения выпавшего при обработке кислотой геля  $\text{SiO}_2$ ). При такой обработке частично будут растворяться и заполнители, поэтому результаты анализа будут более точными лишь в том случае, если имеются в наличии и будут проанализированы также исходные материалы бетона. В противном случае, при расчете приходится принимать условные величины, что снижает точность анализа.

**Метод определения содержания цемента по разности** складывается из следующих операций:

- разложение бетона нагреванием, иногда с последующей химической обработкой для отделения цемента с поверхности зерен заполнителя;
- разделения (на ситах) полученных заполнителей и определения количества отдельных фракций;
- определение содержания цемента по разности.

Данный метод является менее точным, так как неточности отдельных прямых определений отражаются на величине, определяемой по разности (т. е. содержанию цемента).

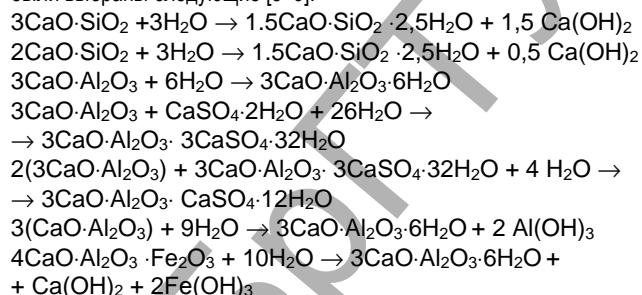
Выбор того или иного метода или же применение обоих производится лабораторией в зависимости от поставленной задачи и цели работы.

*В данной работе предложено оставить основные подходы к определению вещественного состава, включая определение содержания инертных составляющих. В то время как количество вяжущего предложено определять теоретически исходя из определения расчетным методом степени гидратации с одновременным определением количества химически-связанной воды.*

Содержание крупного заполнителя в бетоне определяем по стандартной методике весовым методом. Выделение крупного заполнителя достигается за счет физического эффекта термической дезагрегации пробы бетона.

**Теоретические предпосылки к определению расхода цемента в бетоне.** Исходными данными послужил минералогический состав цемента одного из цементных заводов<sup>1</sup>, %:  $\text{C}_2\text{S} - 11,9$ ;  $\text{C}_3\text{S} - 65,7$ ;  $\text{C}_4\text{A} - 7,5$ ;  $\text{C}_4\text{AF} - 10,2$ ;  $\text{CSH}_2 - 3,2$  и  $\text{CaO}_{\text{св}} - 0,8$ . Учтены исследования [4], о том, что химический состав цемента практически не зависит от его дисперсности: она меняется в 1,5 раза, а химсостав – в среднем, в пределах  $\pm 1,75\%$ .

Гидратационное развитие структуры моделируется на основании химических реакций, наиболее характерных для основных компонентов, входящих в состав цемента. Среди большого количества предлагаемых различными авторами схем и механизмов реакций, были выбраны следующие [5–9]:



**Объемные концентрации компонентов.** Объемный баланс компонентов системы составляется на основании следующего допущения: изменение фазового состава многокомпонентной цементной системы может быть установлено простым сложением результатов реакций отдельных компонентов. При этом в любой момент времени должно выполняться условие [8]:

$$\sum_i f_i = 1, \quad (1)$$

где  $f_i$  – относительное объемное содержание компонента (минерала, воды, воздуха) в системе.

В момент затворения объемный баланс системы представляет собой сумму объемов минералов вяжущего и воды.

Для перехода от минералогического состава цемента (выражаемого обычно в % от общей массы вяжущего) к начальному объемному фазовому составу цементной суспензии, в которой вода, наряду с минералами, рассматривается как один из компонентов, слагающих общий объем системы, может быть использована зависимость:

$$f_{x,0} = \frac{m_x}{\rho_x(1 + w/c)}, \quad (2)$$

где  $m_x$  – массовая доля минерала  $X$  в цементе (характеристика минералогического состава),  $\rho_x$  – истинная плотность минерала,  $\text{г/см}^3$ ,  $w/c$  – водоцементное отношение.

Изменение объемных концентраций  $f_{i(x)}$  минералов в процессе реакций рассчитывается в зависимости от степени гидратации:

$$f_x(t) = f_{x,0} (1 - \alpha_x(t)), \quad (3)$$

где  $\alpha_x(t)$  – степень гидратации минерала  $X$  в момент времени  $t$ .

Следует обратить внимание на то, что в расчетах фазового состава цементной системы фигурируют частные степени гидратации, найденные отдельно для каждого минерала с учетом его кинетических характеристик и с применением общих для всех минералов положений химической кинетики.

Общая степень гидратации вяжущего (обобщенная, экспериментально определяемая характеристика кинетики твердения цемента) может быть рассчитана, согласно принципу аддитивности, как результат совместного действия отдельных минералов по их частным степеням гидратации в данный момент времени:

<sup>1</sup> в Республике Беларусь выпускаются исключительно алитовые цементы, поэтому этот состав с определенной долей допущения будет актуален и для цементов других производителей.

$$\alpha_{tot}(t) = \frac{\sum_i (\alpha_X(t) \cdot f_{i(X),0})}{\sum_i f_{i(X),0}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{tot}(t)$ ,  $\alpha_X(t)$  – соответственно, общая степень гидратации вяжущего и отдельного минерала  $X$  в момент времени  $t$ ;

$f_{i(X),0}$  – начальная объемная концентрация отдельного минерала  $X$  в гидратирующей системе.

Объем продуктов гидратации  $f_p$ , при наличии необходимых условий, обеспечивающих их появление, следует рассчитывать с учетом стехиометрии реакций:

$$f_p = \alpha_X \cdot f_{X,0} \frac{V_{1M,p} \cdot n_p}{V_{1M,X} \cdot n_X}, \quad (5)$$

где  $\alpha_X$  – степень гидратации минерала  $X$ ;

$f_{X,0}$  – начальная объемная концентрация минерала  $X$  в гидратирующей системе,

$n_{p(X)}$  – стехиометрический коэффициент продукта (минерала  $X$ ) согласно реакции;

$V_{1M,p(X)}$  – молярный объем продукта реакции (минерала  $X$ ):

$$V_{1M,p(X)} = M_{p(X)} / \rho_{p(X)}, \quad (6)$$

где  $M_{p(X)}$  – молярная масса вещества;

$\rho_{p(X)}$  – плотность вещества, принимаемая по таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики компонентов реакций согласно[8]

Компоненты реакций		Молярная масса, $M_{p(X)}$ , г/моль	Плотность, $\rho_{p(X)}$ , г/см <sup>3</sup>
Реагенты	$C_3S$	228.32	3.15
	$C_2S$	172.25	3.28
	$C_3A$	270.20	3.03
	$CA$	158.04	3.01
	$C_4AF$	485.97	3.73
	$\bar{C}SH_2$	172.17	2.32
	$H_2O$	18.02	1.00
Конечные продукты кристаллизации	$CH$	74.07	2.24
	$C_{1,5}SH_{2,5}$	189.24	2.35
	$C_3AH_6$	378.28	2.52
	$C_6\bar{A}S_3H_{32}$	1237.09	1.70
	$C_4\bar{A}SH_{12}$	622.50	1.99
	$AH_3$	78.00	2.40
	$FH_3$	215.74	3.00

Баланс объемов воды представляет собой сумму объемов свободной, химически связанной и адсорбированной воды:

$$W_{tot} = W_{ch} + W_{ad} + W_{cap}, \quad (7)$$

где  $W_{tot}$  – количество воды, взятое для затворения:

$$W_{tot} = 1 - \sum_X f_{X,0}; \quad (8)$$

$f_{X,0}$  – начальное содержание минерала  $X$ ;

$W_{ch}$  – количество химически связанной воды:

$$W_{ch} = \sum_X \left( \alpha_X \cdot f_{X,0} \frac{V_{1M,w} \cdot n_{w(X)}}{V_{1M,X} \cdot n_X} \right); \quad (9)$$

$V_{1M,w}$ ,  $n_{w(X)}$  – молярный объем и стехиометрический коэффициент воды в реакции минерала  $X$ ;

$W_{ad}$  – вода, адсорбированная стенками пор цементного камня:

$$W_{ad} = S_{cap} \cdot \delta_w; \quad (10)$$

$\delta_w$  = (8..15) Å – толщина слоя адсорбированной воды;

$S_{cap}$  – площадь поверхности пор;

$W_{cap}$  – свободная вода в капиллярах.

Таким образом, отношение массы химически связанной воды к массе исходных минералов ( $C_2S$  и  $C_3S$ ) в возрасте, превышающем 28 сут., находится в пределах 15,7–19,8% (в среднем 18%). Силикатная фаза, гидратируясь, поставляет молекул  $Ca(OH)_2$  в 1,5 раза больше, чем всех вместе взятых молекул гидроминералов.

Отношение массы химически связанной воды к исходным минералам ( $C_3A$  и  $C_4AF$ ) составляет 59–65% (в среднем 62%), что в 4,4 раза больше, чем у гидросиликатов кальция. Наблюдается кругооборот 15%  $Ca(OH)_2$ , т. е. воспроизводство, а затем потребление его для хода других химических реакций. Имеется промежуточная фаза CFH, которая возникает, а затем, в качестве исходного сырья, преобразуется в многоосновные гидроферриты кальция.

Вода в бетоне – химически и физически связана. Первая участвует в превращении веществ (синтез, реакции гидратации), вторая – в технологическом обеспечении этого. Количество воды для гидратации минералов и в целом цемента приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Количество химически связанной воды при гидратации минералов цементного клинкера  $Q_{связ}$

Отношение	Количество $H_2O$ , %	Отношение	Количество $H_2O$ , %
$H_2O : C_2S$	15,7	$H_2O : C_4AF$	59,4
$H_2O : C_3S$	19,8	$H_2O : C_3AS_3$	137,7
$H_2O : C_3A$	64,9	$H_2O : \text{Цемент}$	24,8

Таким образом, для данного цемента алитовой группы по результатам расчета степень химически связанной воды в бетоне при эксплуатации свыше 28 сут. составила  $Q_{связ}=25\%$ .

Определив прокаливанием количество связанной воды  $B_{связ}$  в пробе бетона, и зная теоретическое количество связанной воды от массы цемента, определим содержание последнего.

$$\zeta = \frac{B_{связ}}{Q_{связ}}. \quad (11)$$

Зная количество физической (свободной) воды, определенной высушиванием пробы бетона до постоянной массы, найдем общее водоцементное отношение в бетоне.

$$\frac{B}{\zeta} = \frac{B_{св} + B_{связ}}{\zeta}. \quad (12)$$

Далее количество мелко заполнителя в растворной части бетона будет равно разности между плотностью и суммой ранее определенных компонентов (цемент+вода+щебень).

Для анализа точности предложенной методики был определен расход цемента в образцах бетона с заранее известным составом. Результаты расчетов для на основе полученных данных представлены в таблице 3.

**Заключение.** 1. Предложенная методика является более точной с точки зрения определения расхода вяжущего, поскольку исключается риск учета в количестве вяжущего, определенного по стандартной методике, пылевой фракции песка.

Таблица 3 – Результаты расчетов

№ пробы	Количество химически связанной воды, %		Количество свободной воды		В/Ц	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси		Погрешность, %
	Общее от массы бетона	От массы цемента	Общее	В % от массы цемента		По расчёту	Фактический	
2	1,69	14	2,50	21	0,35	460	450	2,2%
3	1,65	13,7	3,84	32,3	0,46	450	450	0%

2. Идентификация вещественного состава с возможностью теоретического расчета количества вяжущего в смеси облегчит подход к определению состава, поскольку отпадет необходимость использования ряда химических реактивов.

3. Возможность определения вещественного состава бетона позволит получить дополнительную информацию о качестве производства работ и выпуска бетонных смесей;

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Требования, показатели, изготовление и соответствие : СТБ EN 206 Бетон. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2016. – 105 с.
2. Методические рекомендации по определению вещественного состава бетона // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». – Москва, 2017. – 92 с.
3. Лещинский, М. Ю. Испытание бетона : справочное пособие. – М. : Стройиздат, 1980. – 360 с., ил.
4. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон. – М. : ГСИ, 1961.
5. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества. – Москва : Стройиздат, 1986 – 464 с.
6. Волженский, А. В. Характер и роль изменений в объемах фаз при твердении вяжущих и бетонов // Бетон и железобетон. – 1969. – № 3. – С. 16–20.
7. Bentz D.P. Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development, J. Am. Ceram Soc., 80 [1] 3-21, 1997.
8. Bernard, O. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials / O. Bernard, F. J. Ulm, E. Lemarchand // Cement and Concrete Research. – Vol. 33. – 2003. – P. 1293–1309.
9. Turriziani, R. The Chemistry of Cements, 1964. – P. 260–277.

Материал поступил в редакцию 15.04.2019

#### PAVLOVA I. P. The modified experimental and theoretical methodology of determination of material composition of concrete

Concrete mix material constitution determination is frequently provoked by necessary of receipt and identification main reasons, leading in concrete structures defects appearance. In present paper are proposed modified method for concrete mix material constitution, differ from traditional probability for theoretical calculation of concrete mix binder part. This approach make possible material constitution determination even without availability of chemical reagents. Theoretical evaluation of cement amount are based on chemically combined water determination in agreement with chemical reaction stoichiometry, degree of hydration, clinker mineralogical compound and so on.

УДК 691.32 (043.3)

Павлова И. П., Беломесова К. Ю.

### ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ БАЗАЛЬТОВОГО ФИБРОВЛОКНА В ЦЕМЕНТНУЮ СИСТЕМУ

**Введение.** Возведение современных зданий и сооружений требует применения бетонов, обладающих высокими эксплуатационными и физико-механическими характеристиками. Одним из наиболее актуальных на сегодняшний день вариантов таких композиционных материалов является фибробетон – бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами).

Фибробетоны по праву занимают свою нишу в области высокофункциональных и высококачественных бетонных композитов, так как обладают значениями по прочности, трещиностойкости, водонепроницаемости, морозостойкости и долговечности во много раз превосходящими эти значения у традиционных бетонов. Однако, несмотря на целый ряд преимуществ фибробетона перед традиционным бетоном, последний по-прежнему занимает лидирующие позиции по применению в современном строительстве, чего нельзя сказать о фибробетоне.

Связано это в первую очередь с широким диапазоном вопросов, возникающих перед исследователем в данной области, многие из которых до конца не изучены и на которые нет однозначного ответа.

Перечень основных вопросов, с которыми сталкивается исследователь при подготовке к получению фибробетона, выглядит следующим образом: оптимальный вид армирующего волокна (фибры), его количество, способ введения, а также определение характера и

степени влияния последнего на важнейшие характеристики бетонного композита (прочность, трещиностойкость, усадочные деформации и т. д.). Перечисленные выше аспекты являются ключевыми в целях получения на выходе композита с высокими эксплуатационными характеристиками.

Что касается выбора материалов, применяемых для дисперсного армирования, то в качестве последних выступают различные виды металлических и неметаллических волокон минерального и органического происхождения. На сегодняшний день наиболее популярными являются: стальные, стеклянные, базальтовые, полипропиленовые и т. п.

Каждое из перечисленных выше видов волокон обладает своими преимуществами и недостатками перед другим видом, причем каждое из этих волокон ведет себя по-разному по отношению к цементной матрице бетонных композитов. Речь идет о стойкости данных волокон в щелочной среде гидратирующего цемента. Таким образом, подходу к выбору вида армирующего волокна, необходимо изучить не только его технические характеристики, но и в случае применения данного волокна в цементных композитах оценить степень стойкости последнего в щелочной среде бетона. В таблице 1 представлены основные характеристики и свойства наиболее известных и нашедших применение в строительной отрасли армирующих волокон (фибр).

Беломесова К. Ю., магистр, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.