

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.З. КАДИЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТОЙКОСТИ БЕТОНОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НИЗКИХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР (ЧАСТЬ 2)

*Аннотация.* Выполнены обобщение и анализ научных гипотез и теорий отечественных и зарубежных исследователей в области механизма морозного воздействия на бетон. Представлена критическая авторская оценка их с позиций основ физико-химии силикатов и физики твердого тела. Сформулированы исходные предпосылки морозостойкости тяжелых бетонов и равнопрочных конструкционных легких бетонов в связи с их структурой, в т.ч. при использовании целенаправленных экспериментальных исследований авторов настоящей статьи по связи морозостойкости этих бетонов с их поровой структурой.

При этом использованы термодинамические модели замерзания-оттаивания воды в т.ч. адсорбционных ее слоев в капиллярах пористых структур цементных материалов. Рассмотрены данные исследований критической степени водонасыщения бетона и дана обоснованная оценка ее как интегральной характеристики, определяющей возможность образования микро-, затем макродефектов в структуре бетона в процессе его циклического замораживания и оттаивания.

На базе результатов аналитических и экспериментальных исследований, при использовании основных положений физики твердого тела, а также физико-химии силикатов разработаны физико-химические основы стойкости конструкционных легких бетонов в сравнении с равнопрочным тяжелыми бетонами к воздействию низких (до минус 70 °С) отрицательных температур.

Результаты выполненной работы рассматриваются авторами как современная научная база для разработки основных положений технологии изготовления конструкционных легких и тяжелых бетонов с высокими показателями долговечности (морозостойкости и водонепроницаемости), предназначенных для железобетонных конструкций инженерных сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, в т.ч. в условиях арктического побережья.

**Ключевые слова:** бетоны, цементный камень, отрицательные температуры, поры-капилляры, поры геля, морозостойкость, водонепроницаемость.

V.N. YARMAKOVSKY<sup>1</sup>, D.Z. KADIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

## PHYSICAL BASIS OF CONCRETE DURABILITY AT LOW SUBZERO TEMPERATURES (PART 2)

*Abstract.* Generalization and analysis of scientific hypotheses and theories of domestic and foreign researchers in the field of the frost action mechanism on concrete has been performed. A critical author's assessment of them from the point of view of the basics of physical chemistry of silicates and solid state physics is presented. The initial prerequisites for the frost resistance of heavy concrete and equal-strength structural light concrete in connection with their structure are formulated, including of this article author's targeted experimental studies on the relationship of the frost resistance of these concretes with their pore structure.

Thermodynamic models of freezing-thawing of water, including its adsorption layers in capillaries of cement materials porous structures are used. The data of studies of the critical degree of water saturation of concrete are considered and a reasonable assessment of it is given as an integral

*characteristic that determines the possibility of formation of micro- and then macro-defects in the concrete structure during its cyclic freezing and thawing.*

*Based on the results of analytical and experimental studies, using the basic principles of physics of the solid state, as well as the physical and physical-chemistry of silicates, has been developed the physical-chemical basis for the resistance of structural lightweight concrete in comparison with equally strong normal weight concrete to the effects of low (up to minus 70 °C) subzero temperatures.*

*The results of this work are considered by the authors as a modern scientific basis for the development of the main provisions of the technology for manufacturing structural lightweight and normal weight concretes with high durability (frost resistance and water resistance), intended for reinforced concrete structures of engineering constructions, operated in severe climatic conditions, including in the conditions of the Arctic coast.*

**Keywords:** concrete, hardened cement paste, subzero temperatures, capillary pores, gel pores, frost resistance, water resistance.

## **1 К оценке морозостойкости конструкционных легких бетонов в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами в связи с разработанными физико-химическими основами стойкости бетонов к воздействию низких отрицательных температур**

### **1.1 Состояние нормирования**

В СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» в главе 6 «Бетоны» приведены нормативные характеристики тяжелых бетонов и конструкционных легких бетонов (КЛБ): максимальные марки по морозостойкости тяжелого бетона составляют F1000, конструкционных легких бетонов – также F1000; максимальные марки по водонепроницаемости тяжелого бетона – W20, а конструкционного легкого бетона – W12.

В то же время следует отметить, что результаты крупномасштабных целенаправленных исследований морозостойкости и водонепроницаемости КЛБ различных классов по прочности на сжатие, изготовленных на пористых заполнителях различных видов, в т.ч. полученных из продуктов переработки техногенных образований (в основном металлургии и топливной энергетики), выполненных в лаборатории легких бетонов и конструкций НИИЖБа (зав. лаб. – В.Н. Ярмаковский) [1], а также в ЦНИЛ Главлипецкстроя (зав. лаб. – Н.Д. Голубых, инженер – В.В. Скоморохов) [2, 3] в период 1990-1998 гг., показали следующее.

В зависимости от технологии изготовления КЛБ марки их по морозостойкости составляют от F1000 до F1500, а марки по водонепроницаемости – от W16 до W20.

Следует при этом отметить, что в отечественных нормативных источниках, а именно в нормах, относящихся к расчету и проектированию железобетонных конструкций СНиП, разрабатываемых НИИЖБом, начиная с 1962 года (СНиП ПВ.1-62, затем СНиП П.21-75, СНиП П.2.03-84, затем СП 63.13330.2012, и наконец СП 63.13330.2018) марки по морозостойкости, водонепроницаемости легких бетонов в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами оказались без какого-либо объективного обоснования явно занижены. Так, максимальные значения этих нормативных показателей составляли:

- в СНиП П-В.1-62, а затем в СНиП П.21-75, в СНиП П.2.03-84 для тяжелого бетона и легкого бетона – F500 и W12;

- в СП 63.13330.2012 для тяжелого бетона – F1000 и W20, а для легкого бетона – F500 и W12;

- в СП 63.13330.2018 для тяжелого бетона – F1000 и W20, а для легкого бетона – F1000 и W12.

В то же время НИИЖБом уже в 1960-х – 70-х годах (сначала в Центральной лаборатории коррозии (ЦЛК) – зав. лаб. В.М. Москвин [4]), затем в лаборатории легких бетонов и конструкций – зав. лаб. В.Н. Ярмаковский), был выполнен значительный объем экспериментальных исследований по морозостойкости соответственно тяжелых и

равнопрочных конструкционных легких бетонов. Причем инженерами ЦЛК НИИЖБ, а затем кандидатами наук А.Н. Савицким и В.Н. Ярмаковским выполнялись не только лабораторные, но и трудоемкие натурные исследования морозостойкости равнопрочных легких и тяжелых бетонов классов по прочности на сжатие В25-В35 различных составов с минеральными и химическими добавками различных видов в соответствии с действующими на тот период времени Стандартами (ГОСТ 10060-62, затем ГОСТ 10060-76).

*Натурные исследования* выполнялись на соответствующих натуральных стендах в приливно-отливных зонах Кольского залива (г. Мурманск) и Баренцева моря (г. Североморск). Результаты этих исследований, использованные при написании главы 12 «Коррозия бетона и железобетона в морских гидротехнических сооружениях» в монографии [5] под редакцией В.М. Москвина, корреспондируются с результатами вышеизложенных экспериментальных лабораторных исследований, выполненных А.Н. Савицким и В.Н. Ярмаковским.

Результаты лабораторных исследований, подтвержденных результатами натуральных, показали значительное превосходство в морозостойкости конструкционных легких бетонов (КЛБ) различных видов над равнопрочными тяжелыми бетонами: максимальный показатель первых составил F1000-F1500, тогда как показатели вторых – F500-F900. Эти результаты корреспондируются:

- с результатами исследователей различных организаций Канады, в частности «MineralResearchesofCanada» (руководитель – V. Malhotra, ученый секретарь – T. W. Bremner) [6], а также University of New Brunswick (T.W. Bremner, M.D. Thomas и E.G. Moffatt) [7-9]: исследования морозостойкости конструкционных легких бетонов в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами проводились на натурном стенде в приливной зоне Арктического побережья Канады (Северный Ледовитый океан, море Бофорта, о-в Банкс);

- с результатами исследований США (G.C. Hoff) и Норвегии (R. Walum) [10];

- с результатами исследований, выполненных учеными ДальНИИСа В.Н. Свиридовым и В.Д. Малюком [11].

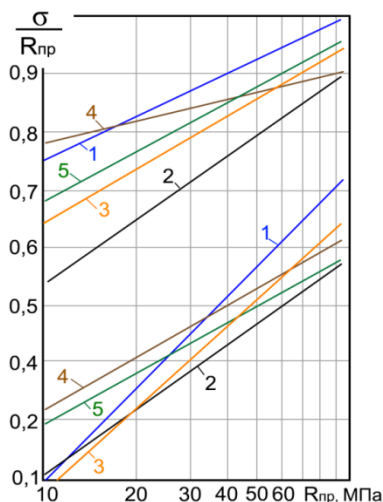
Преимуществам в высоких показателях долговечности КЛБ в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами и перспективам развития и применения в конструкциях инженерных сооружений (прежде всего морских гидротехнических, транспортных и др.) этого вида бетона по существу посвящен пленарный доклад I. Spitzner (Германия) [12] – председателя оргкомитета Международного Симпозиума по конструкционным легким бетонам (Sandefjord, Norway, 1999), а также доклад В.Н. Ярмаковского и Н.И. Карпенко на Международной конференции «Полярная Механика-2016» (г. Владивосток) [13].

В соответствии с решением вышеотмеченного Международного Симпозиума была организована Рабочая группа «TaskGroup 8.1» СЕВ-FIP (*fib*), в которую вошли представители 11-ти стран (в т.ч. представитель от России – В.Н. Ярмаковский) для разработки нормативно-технического документа Международной федерации конструкционных бетонов *fib*, а именно Руководства по проектированию конструкций из легких бетонов [14]. Этот документ был издан в Штутгарте в 1999 г.

К вышеизложенному следует отметить, что морозостойкость и легких и тяжелых бетонов определялась на натурном стенде в приливной зоне Баренцева моря г. Североморска не только в исходном состоянии на образцах-кубах по вышеуказанным ГОСТам, но и по результатам испытаний таких бетонов в напряженном состоянии различного вида: на образцах-балках длиной от 1,5 м до 2 м, нагруженных на пружинных установках поперечной силой различной величины, а также на образцах предварительно напряженных пучковой арматурой балок длиной от 1 м до 1,5 м – центральное (осевое) обжатие от 0,2  $R_{пр}$  до 0,5  $R_{пр}$ . Результаты этих исследований отражены в статье [13].

Оптимальная (с позиций морозостойкости) степень центрального обжатия ( $\sigma_{об}$ ) легкого бетона в балке пучковой арматурой составляла 0,4-0,5  $R_{пр}$ , тогда как в случае изготовления балки из тяжелого бетона величина  $\sigma_{об}$  не превышала 0,3-0,35.

Это можно объяснить преимуществом КЛБ в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном в более высоком уровне нижней границы области микротрещинообразования  $R^0_T/R_{np}$  или области развития обратимых упругих деформаций. Наиболее высока разница в величинах  $R^0_T/R_{np}$  при использовании в КЛБ в качестве крупного заполнителя остеклованного пористого шлакового гравия. Объясняется это, как будет показано ниже, более плотной контактной зоной ШПГ с цементным камнем в сравнении с использованием керамзитового гравия (см. рисунок 1).



**Рисунок 1 – Нижняя ( $R^0_T/R_{np}$ ) и верхняя ( $R^v_T/R_{np}$ ) границы области микротрещинообразования конструкционного легкого бетона и тяжелого бетона классов по прочности на осевое сжатие В30**

- 1 – бетон на пористом остеклованном шлаковом гравии; 2 – тяжелый бетон;  
 3 – керамзитобетон на пористом песке; 4 – керамзитобетон на кварцевом песке;  
 5 – бетон на безобжиговом зольном гравии и кварцевом песке

$$R^0_T/R_{np} = 0,525 \cdot \lg R_{np} - 0,327$$

$$R^v_T/R_{np} = 0,239 \cdot \lg R_{np} + 0,517$$

Таким образом, по существу впервые в отечественной (а потом, как выяснилось, даже в мировой) практике исследований определялось влияние напряженного состояния, причем различного вида, на морозостойкость бетона вообще и в натуральных условиях в частности. Результаты этих исследований были частично доложены в пленарном докладе В.Н. Ярмаковского и Т.У. Брэмнера [15] на III-ей Всероссийской (II-ой Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон, взгляд в будущее» (организаторы: RILEM, Российская академия наук, fib).

Отделением строительных наук РААСН неоднократно предоставлялись НИИЖБу Предложения в СНиП, а затем в СП по соответствующей корректировке нормирования морозостойкости и водонепроницаемости конструкционных легких бетонов, в которых обосновывались установленные во многих отечественных и зарубежных исследованиях преимущества в показателях морозостойкости и водонепроницаемости конструкционных легких бетонов над равнопрочными тяжелыми бетонами. Кроме того, в этих Предложениях содержались рекомендации по расширению номенклатуры КЛБ, а именно по нормативным характеристикам высокопрочных легких бетонов, в частности повышение класса по прочности КЛБ с В40 до В60.

Эти предложения обосновывались не только результатами исследований по разработке бетонов этих классов, но и результатами их внедрения, начиная с 20-го века, причем как в отечественной, так и в зарубежной практике строительства (см. рисунок 2 и статью [13]). К сожалению, эти предложения игнорировались НИИЖБом без всякого на то научного обоснования: класс по прочности на сжатие КЛБ так и остался на уровне СНиП 2.03.01-84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» (с Изменениями N 1, 2). Единственно, что было

достигнуто: в СП 63.13330.2018 – максимальные марки по морозостойкости легких и тяжелых бетонов были приняты равными (F1000), хотя, как отмечалось выше, были уже разработаны в 1990-х годах и внедрены в конструкции гидротехнических сооружений легкие бетоны марок по морозостойкости F1500, а по водонепроницаемости – W20. Однако максимальная марка КЛБ по водонепроницаемости в действующем в настоящее время СП 63.13330.2018 осталась W12, то есть ниже, чем для тяжелого бетона (W20)!? Кстати, максимальный класс по прочности на осевое сжатие КЛБ так и остался на уровне СНиП 2.03.01-84, т.е. класс В40.



*Рисунок 2 – Плавающая платформа «Heidrun» для добычи нефти, установленная на глубине 300 м в норвежском секторе Северного моря. Элементы конструктивного каркаса платформы, а именно цилиндрические оболочки больших диаметров выполнены из легкого бетона класса по прочности на сжатие LC 60 (B60 по ГОСТ 25820)*

### **1.2 Физико-химические основы преимущества в водонепроницаемости и морозостойкости конструкционных легких бетонов в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами**

Установленные результатами вышеприведенных экспериментальных исследований в лабораторных и натуральных условиях преимущества в водонепроницаемости и морозостойкости конструкционных легких бетонов (КЛБ) в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами вполне закономерны:

- с позиций сформулированных выше исходных предпосылок морозостойкости конструкционного легкого бетона и тяжелого бетона в связи с их структурой (см. раздел 1.1 в части 1);

- исходя из результатов выполненного авторами статьи критического анализа современных теорий и гипотез механизма воздействия мороза на бетон (см. раздел 2 в части 1);

- с учетом результатов определения критической степени водонасыщения бетона как интегральной характеристики, определяющей возможность образования микро-, затем макродефектов в структуре бетона в процессе его циклического замораживания-оттаивания и, соответственно, определяющей водонепроницаемость бетона (см. раздел 1.1 части 2).

Действительно, более высокие показатели морозостойкости и водонепроницаемости КЛБ в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном определяются действием следующих

факторов, которые здесь рассматриваются как *физико-химические основы стойкости бетона к воздействию низких отрицательных (до минус 70 °С) температур*:

1. Преимуществом в дифференциальной пористости растворной части КЛБ, а именно в существенно меньшем объеме сообщающихся крупных пор-капилляров в сравнении с мелкими закрытыми порами гелевой составляющей цементного камня, в которых вода замерзает при существенно более низких отрицательных температурах, чем в порах капиллярах или вообще не замерзает при температурах даже при минус 70 °С. Эта позиция обоснована еще в ранней работе проф. Г.И. Горчакова [16], в которой в качестве одного из основных критериев обеспечения достаточно высокой морозостойкости названа предельная величина относительного объема содержания сообщающихся пор капилляров в общей пористости бетона, составляемая 5%.

Последняя обеспечена существенно меньшей в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном при близких реологических свойствах бетонной смеси требуемой величиной истинного водоцементного отношения ( $V_{ист}/Ц$ ) растворной части легкого бетона:

$$V_{ист} = V_0 - V_{зап}$$

где  $V_0$  – это общий расход воды затворения бетонной смеси;  $V_{зап}$  – объем воды, поглощенной крупным пористым заполнителем в процессе приготовления легкобетонной смеси.

При равном расходе воды затворения  $V_0$  в смеси равнопрочных тяжелого и легкого бетона для обеспечения требуемых показателей ее удобоукладываемости значительная часть воды в процессе укладки смеси в конструкцию поглощается крупным пористым заполнителем –  $V_{зап}$ . В дальнейшем в процессе твердения бетона в строительном изделии или в конструкции вода, поглощенная пористым заполнителем, мигрирует обратно в растворную часть, тем самым обеспечивая более благоприятный в сравнении с тяжелым бетоном (с позиций его морозостойкости) характер формирования дифференциальной пористости цементного камня. А именно:

- с меньшим в сравнении с растворной частью тяжелого бетона объемом пор-капилляров, которые к тому же характеризуются меньшим диаметром;
- с более равномерным характером распределения пор в объеме цементного камня.

2. Преимуществом в более плотной контактной зоне (КЗ) крупного пористого заполнителя КЛБ с растворной частью бетона в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном.

Действительно, формирование более плотной контактной зоны в КЛБ в процессе его твердения обусловлено следующими конструктивными процессами, обусловленными: существенно меньшей величиной истинного водоцементного отношения ( $V_{ист}/Ц$ ) в контактной зоне в сравнении с цементной матрицей или растворной частью бетона. Толщина КЗ в конструкционном легком бетоне составляет, по различным данным [17], от 40 до 150 мкм в зависимости от вида, структуры, химико-минералогического и фазового составов зерна крупного пористого заполнителя, от структуры растворной части бетона, а также от условий его твердения (пропаривание или нормально-влажностное).

Величина  $V_{ист}/Ц$  уменьшается при приближении из центра матрицы (растворной части бетона) к оболочке зерна крупного пористого заполнителя. Это вызвано отмеченными выше начальными процессами миграции воды затворения (отсоса) из растворной части бетона в открытые поры зерен пористого заполнителя, происходящими в процессе приготовления легкобетонной смеси. С уменьшением  $V_{ист}/Ц$  повышается плотность и, соответственно, прочность материала формирующейся контактной зоны.

Формирование прочной контактной зоны обусловлено, кроме вышеизложенного, уплотнением ее новообразованиями – продуктами химической реакции минералов зерна пористого заполнителя с соответствующими минералами цементного камня. Это должно быть характерно для пористых шлаковых заполнителей, особенно для заполнителей из гидравлически активных доменных шлаков: в результате взаимодействия поверхностной зоны зерна шлакового заполнителя и цементного теста в зоне их контакта возникают

новообразования, которые, по-видимому, должны являться основным носителем прочности сцепления шлакового заполнителя и цементного теста. Состав возможных новообразований, получающихся при гидратации доменного шлака «активизатором» (минералами цементного камня), достаточно полно освещен в соответствующей литературе.

Так, из работ Ю.М. Бутта, А.А. Майера, Б.Г. Варшала [18] известно, что при гидратации кристаллической составляющей мелилита – основного минерала доменного шлака с известью образуется единственная фаза – гидрогранаты. Гидратация аморфизированного стекла поверхностной зоны пористого шлакового заполнителя, соответствующего составу минерала мелилита, протекает особенно энергично и приводит также к образованию гидрогранатов и, кроме того, гидросиликатов кальция  $C_2SH(A)$  и  $CSH(B)$ .

Таким образом, продукты гидратации и твердения шлаков в присутствии активизатора – цементного клинкера существенно различаются в зависимости от фазового состава шлака: в случае стекловидного (с аморфизированной структурой) шлака процесс гидратации в контактной зоне идет более энергично и приводит при пропаривании легкого бетона, изготовленного на пористых шлаковых заполнителях, к образованию низкоосновных, главным образом, мелкокристаллических гидросиликатов кальция. Последнее существенно способствует повышению прочности контактной зоны КЛБ и, соответственно, показателей его долговечности: морозостойкости и водонепроницаемости.

К этому же выводу приводят результаты обстоятельнейших исследований, выполненных под руководством ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева В.С. Горшкова, С.Е. Александрова [19] в области гидратационных свойств шлаковых стекол в системе:  $CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO - Fe_2O_3$ .

Результаты определения сцепления между образцами из пористого доменного шлака (как стекловидного, так и кристаллического) и цементным камнем, а также для сравнения – между плотным гранодиоритом и цементным камнем при различных условиях твердения, полученные в исследованиях Г.В. Геммерлинга и Л.Б. Цимерманиса [20], приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, явно наибольшее сцепление наблюдается в случае стекловидного шлака независимо от условий твердения образцов. Это обусловлено относительно высокой активностью минералов шлаковых стекол, причем, главным образом, минералов изотропной разновидности стекла (геленита, окерманита, мелилита, псевдоволластонита и др.).

Таблица 1- Сцепление цементного камня с заполнителем

Вид материала заполнителя	Прочность сцепления в контактной зоне при растяжении, МПа	
	Пропаривание 6 ч + 14 сут. НВТ	Нормально-влажностные условия твердения (НВТ), 28 сут.
Стекловидный шлак	6,4	4,2
Кристаллический шлак	2,8	2,2
Гранодиорит	0,1	0,8

Вышеизложенную научную концепцию, обосновывающую преимущества КЛБ в существенно более плотной контактной зоне растворной части и крупного пористого заполнителя (КПЗ) в сравнении с контактной зоной равнопрочного тяжелого бетона, причем при использовании различных по химико-минералогическому составу и, соответственно реакционной способности, видов КПЗ подтверждают результаты следующих исследований, выполненных в лаборатории энергоресурсосберегающих легких бетонов и конструкций НИИСФ под руководством В.Н. Ярмаковского.

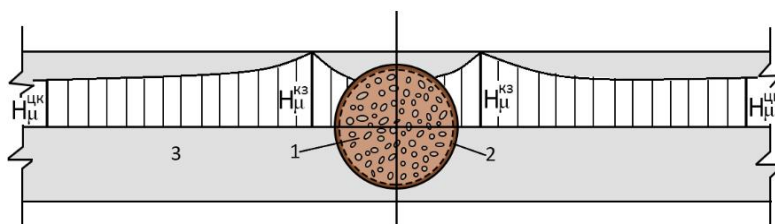
На срезах образцов-балочек 4\*4\*16 см из КЛБ класса по прочности В40 определялась микротвердость в зоне, близкой к контакту зерна крупного пористого заполнителя и растворной части бетона на мелком плотном заполнителе (кварцевом песке с  $M_k=2,5$ ).



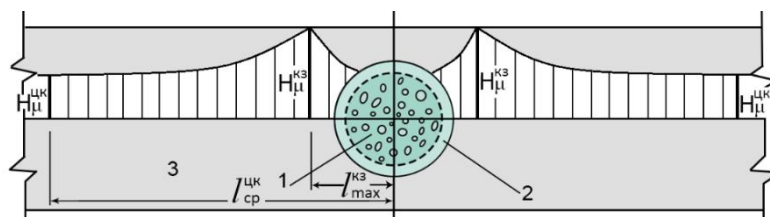
При изготовлении КЛБ использовались два вида крупного пористого заполнителя со средним диаметром зерна  $d=20$  мм:

- традиционный керамзитовый гравий марки по насыпной плотности М500;
- пористый гравий из поризованных расплавов доменных шлаков со стекловидной оболочкой также марки по насыпной плотности М500, изготавливаемый по запатентованной технологии\* [21], разработанной авторским коллективом в составе руководителя и специалистов шлакоперерабатывающего цеха Новоліпецкого металлургического комбината (НЛМК), а также Я.Ш. Школьника и В.Н. Ярмаковского [22].

Величина микротвердости оболочки зерен крупного заполнителя контактной зоны и растворной части на удалении  $3d$  от оболочки зерна заполнителя определялась с помощью алмазной пирамидки микротвердомера «ПМТ-3». Результаты исследований в виде эпюр средних значений микротвердости указанных компонентов КЛБ приведены на рисунке 3.



а) Условный фрагмент бетона на керамзитовом гравии (КГ). 1 – зерно КГ; 2 – оболочка КГ – обожженной керамики; 3 – цементно-песчаный камень (матрица).  $H_{\mu}^{кз} = 1255$  кгс/мм<sup>2</sup>.  $H_{\mu}^{цк} = 860$  кгс/мм<sup>2</sup>



б) Условный фрагмент бетона на пористом шлаковом гравии (ШПГ). 1 – зерно ШПГ; 2 – стекловидная оболочка ШПГ; 3 – цементно-песчаный камень (матрица).  $H_{\mu}^{кз} = 1580$  кгс/мм<sup>2</sup>.  $H_{\mu}^{цк} = 880$  кгс/мм<sup>2</sup>

**Рисунок 3 – Эпюры средних значений микротвердости ( $H_{\mu}$ ) затвердевшего ( $\tau = 28$  сут НВТ) цементно-песчаного камня ( $H_{\mu}^{цк}$ ) – затвердевшей растворной части легкого бетона класса по прочности на сжатие В50 и его контактной зоны ( $H_{\mu}^{кз}$ ) с зерном крупного пористого заполнителя**

$l_{max}^{кз}$  – расстояние от центра зерна крупного заполнителя до усредненной максимальной ординаты эпюры микротвердости контактной зоны

$l_{cp}^{цк}$  – то же, до усредненной ординаты условной центральной оси фрагмента растворной части ЦК бетона между зернами крупного заполнителя

Рассмотрение эпюр показывает: микротвердость затвердевшей растворной части бетона (цементно-песчаного камня) в зоне, близкой к оболочке пористого зерна крупного заполнителя ( $H_{\mu}^{кз}$ ) и в средней зоне растворной части ( $H_{\mu}^{цк}$ ), составляет:

- в случае использования керамзитового гравия Ульяновского завода ЖБИ марки по насыпной плотности М500 –  $H_{\mu}^{кз} = 1255$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $H_{\mu}^{цк} = 860$  кгс/мм<sup>2</sup>

- в случае использования остеклованного пористого шлакового гравия по технологии НЛМК (см. выше) –  $H_{\mu}^{кз} = 1580$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $H_{\mu}^{цк} = 880$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Большая величина микротвердости контактной зоны растворной части бетона  $H_{\mu}^{кз}$  в сравнении с аналогичной характеристикой цементного камня на удалении от контактной зоны

\*Патент [21] экспонировался на Международном салоне изобретений и патентов «Архимед-2001» и награжден серебряной медалью.



$H_{\mu}^{шк}$  обусловлена меньшим значением  $V_{ист}/Ц$  в этой зоне в сравнении с  $V_3/Ц$  растворной части за счет поглощения пористым заполнителем части воды затворения  $V_3/Ц$ .

Преимущество в прочности контактной зоны остеклованного пористого шлакового гравия с растворной частью бетона в сравнении с вариантом использования керамзитового гравия обусловлено новообразованиями в этой зоне в результате химического взаимодействия стеклофазы оболочки ШПГ и минералов цементного камня растворной части бетона. Действием этого безусловно структурообразующего фактора можно объяснить и отмеченный выше (см. рисунок 1) значимо более высокий уровень нижней границы области микротрещинообразования  $R^0_T/R_{пр}$  конструкционного легкого бетона, изготавливаемого на основе остеклованного пористого шлакового гравия в сравнении с равнопрочным бетоном на основе керамзитового гравия.

## **2 Основные выводы (по частям 1 и 2 статьи)**

1. Выполнены обобщение и анализ научных гипотез и теорий отечественных и зарубежных исследователей в области механизма морозного воздействия на бетон. Представлена критическая авторская оценка этих данных с позиций основ физико-химии силикатов и физики твердого тела.

2. Сформулированы исходные предпосылки морозостойкости тяжелых бетонов и равнопрочных конструкционных легких бетонов в связи с их структурой на базе использования целенаправленных тонких экспериментальных исследований (в т.ч. авторов настоящей статьи) по связи морозостойкости этих бетонов с их поровой структурой. При этом использованы известные термодинамические модели замерзания-оттаивания воды (в т.ч. адсорбционных ее слоев в капиллярах) в пористых структурах цементных материалов в процессе экспериментальной идентификации механизмов повреждения скелета бетона при фазовом переходе порового водного раствора в лед.

3. Рассмотрены данные исследований и дана обоснованная оценка критической степени водонасыщения бетона как интегральной характеристики, определяющей возможность образования микро-, затем макродефектов в структуре бетона в процессе его циклического замораживания и оттаивания.

4. На базе результатов вышеуказанных аналитических и тонких экспериментальных исследований, при использовании основных положений физики твердого тела, а также физико-химии силикатов разработаны физико-химические основы стойкости конструкционных легких бетонов в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами к воздействию низких (до минус 70 °С) отрицательных температур.

5. Результаты этой работы следует рассматривать как современную научную базу для разработки основных положений технологии изготовления конструкционных легких и тяжелых бетонов с высокими показателями долговечности (морозостойкости и водонепроницаемости), предназначенных для железобетонных конструкций инженерных сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, в т.ч. в условиях арктического побережья.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетонная смесь для изготовления строительных конструкций, подверженных циклическому замораживанию и оттаиванию. Авторское свидетельство на изобретение №272871. БИ №19 от 03.VI.1970
2. Голубых Н.Д. Методы оценки стойкости бетона в суровых климатических условиях и агрессивной среде. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва, НИИЖБ. 1975. 25 с.
3. Скоморохов В.В. Конструкционный шлакопемзобетон повышенной морозостойкости. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Москва. 1990. 24 с.

4. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Под редакцией В.М. Москвина. Ленинград: Ленинградское отделение Стройиздата, 1973. 169 с.
5. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. Под общей редакцией В.М. Москвина. Москва: Стройиздат, 1980. 536 с.
6. Malhotra V., Bremner T. Performance of Concrete at Treat Island. USA: CANMET Investigations, Performance of Concrete in Marine Environment, Third CANMET/ACI International Conference SP-163, St. Andrews by-the-Sea. Canada. 1996. Pp.1-52.
7. Thomas M.D., Bremner T.W., Scott A.C. Actual and modeled performance in a tidal zone // Concrete International. November, 2011. Pp.23-28.
8. Thomas M.D., Bremner T. Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Pp. 358-364.
9. Thomas M.D., Moffatt E.G. The Performance of Concrete in a Marine Environment Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. 18 - 20 July 2018. PL01 2018. University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom. Pp. 1-15.
10. Hoff G.C. (USA), Walum R. (Norway), Wang J.K. (Canada). The use of structural lightweight aggregates concrete in offshore platforms // International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 349-363.
11. Свиридов В.Н., Малюк В.Д. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке. Труды III-ей Всероссийской (II-ой Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и Железобетон – Взгляд в Будущее» (организаторы: RILEM, Российская академия наук, fib) // Сб. трудов конференции «Бетон и Железобетон – Взгляд в Будущее», том II. Секционные доклады. С. 155-168.
12. Spitzner I. (Germany). A review of the development of lightweight aggregates – history and actual survey. International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 22-32.
13. Ярмаковский В.Н., Карпенко Н.И. Особенности технологии, структуры и механики высокопрочных конструкционных легких бетонов для морских гидротехнических сооружений в условиях Арктического континентального шельфа // Труды Международной конференции «Полярная механика-2016». г. Владивосток. 2016. С. 24-32.
14. "Lightweight Aggregate Concrete. Codes and standards. State-of-art report prepared by Task Group 8. 1". CEB-FIP (fib). Stuttgart. 1999. 40 p. (Participants from 11 countries. From Russia – V.N. Yarmakovsky).
15. Ярмаковский В.Н. и Брэмнер Т.У. Легкие бетоны. Настоящее и будущее // Сб. трудов III-ей Всероссийской (II-я Международной) конференции «Бетон и Железобетон – Взгляд в Будущее» (организаторы: RILEM, Российская академия наук, fib). Т. 1. Пленарные доклады. С. 455-465.
16. Горчаков Г. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. Москва: Стройиздат, 1965. 194 с.
17. Петров В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности. Самара: СГАСУ, 2005. 152 с.
18. Бутг Ю.М., Майер А.А., Варшал Б.Г. Гидратация минералогических составляющих доменных шлаков. В кн. «Вопросы шлакопереработки». Челябинск, 1960. с. 256.
19. Горшков В.С., Александров С.Е. и др. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве // Москва: Стройиздат, 1985. с.273.
20. Геммерлинг Г.В., Цимерманис Л.Б. Шлакопемзобетон. Москва: Стройиздат, 1969. 130 с.
21. Патент РФ № RU 2087438 С1. Установка для производства остеклованного пористого гравия. Панченко В.Ф., Франценюк И.В., Денисов Г.А., Школьник Я.Ш., Ярмаковский В.Н., Каданцев Н.В., Коротаяев А.С. БИ от 20.08.1997
22. Iarmakovski V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes and their application. International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 363-373.

## REFERENCES

1. Savitsky A.N., Yarmakovsky V.N. Betonnaya smes' dlya izgotovleniya stroitel'nyh konstrukciy, podverzhennyh ciklicheskomu zamorazhivaniyu i ottaivaniyu [Concrete mix for the manufacture of building structures subject to cyclic freezing and thawing]. Author's certificate of invention No. 272871. BI No.19 from 03.VI. 1970. (rus)
2. Golubykh N.D. Metody ocenki stoykosti betona v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh i aggressivnoy srede [Methods for assessing the strength of concrete in harsh climatic conditions and aggressive environments]. Candidate of technical Sciences thesis abstract. Moscow, NIIZH. 1975. 25 p. (rus)
3. Skomorohov V.V. Konstrukcionnyy shlakopemzobeton povyshennoy morozostoykosti [Structural slag-pumice-concrete with high frost resistance]. Candidate of technical Sciences thesis abstract. Moscow, 1990. 24 p. (rus)

4. Moskvina V.M., Kapkin M.M., Savitsky A.N., Yarmakovskiy V.N. Beton dlya stroitel'stva v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh [Concrete for construction in severe climatic conditions] edited by Moskvina V. M. Leningrad: Leningrad Department of Stroyizdat, 1973. 169 p. (rus)
5. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection] edited by Moskvina V.M. Moscow: Stroyizdat, 1980, 536 p. (rus)
6. Malhotra V., Bremner T. Performance of Concrete at Treat Island. USA: CANMET Investigations, Performance of Concrete in Marine Environment, Third CANMET/ACI International Conference SP-163, St. Andrews by-the-Sea. Canada. 1996. Pp.1-52.
7. Thomas M.D., Bremner T.W., Scott A.C. Actual and modeled performance in a tidal zone. Concrete International. November, 2011. Pp.23-28.
8. Thomas M.D., Bremner T. Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment. Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Pp. 358-364.
9. Thomas M.D. and Moffatt E.G. The Performance of Concrete in a Marine Environment Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. 18 - 20 July 2018. PL01 2018. University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom. Pp. 1-15.
10. Hoff G.C. (USA), Walum R. (Norway), Wang J.K. (Canada). The use of structural lightweight aggregates concrete in offshore platforms // International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 349-363.
11. Sviridov V.N., Malyuk V.D. Ocenka dolgovechnosti betona v konstrukciyakh morskikh sooruzheniy po opytu stroitel'stva na Dal'nem Vostoke [Evaluating the durability of concrete in marine structures based on the experience of construction in the far East] Proceedings of the III-th all-Russian (II-th International) conference on concrete and reinforced concrete "Concrete and reinforced Concrete-a Look into the Future" (organizers: RILEM, Russian Academy of Sciences, fib) // Proceedings of the conference "Concrete and reinforced Concrete-a Look into the Future", Vol. II. Section reports. Pp. 155-168. (rus)
12. Spitzner I. (Germany). A review of the development of lightweight aggregates – history and actual survey. International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 22-32.
13. Yarmakovskiy V.N., Karpenko N.I. Osobennosti tekhnologii, struktury i mekhaniki vysokoprochnykh konstruktsionnykh legkiy betonov dlya morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v usloviyakh Arkticheskogo kontinental'nogo shel'fa [Features of technology, structure and mechanics of high-strength structural lightweight concrete for marine hydraulic structures in the Arctic continental shelf]. Proceedings of the International conference "Polar Mechanics-2016". Vladivostok. 2016. Pp. 24-32. (rus)
14. "Lightweight Aggregate Concrete. Codes and standards. State-of-art report prepared by Task Group 8. 1". CEB-FIP (fib). Stuttgart. 1999. 40 p. (Participants from 11 countries. From Russia – V.N. Yarmakovskiy).
15. Yarmakovskiy V.N., Bremner T.U. Legkie betony. Nastoyashchee i budushchee [Lightweight concrete. The present and the future] Proceedings of the III-th all-Russian (II-th International) conference "Concrete and Reinforced Concrete. Look into the Future" (organizers: RILEM, Russian Academy of Sciences, fib). Vol. 1. Plenary reports. Pp. 455-465. (rus)
16. Gorchakov G. I., Kapkin M. M., Skramtaev B. G. Povyshenie morozostoykosti betona v konstrukciyakh promyshlennykh i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Increasing the frost resistance of concrete in industrial and hydraulic structures]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 194 p. (rus)
17. Petrov V.P. Poristye zapolniteli iz othodov promyshlennosti [Porous fillers from industrial waste]. Samara: SGASU, 2005. 152 p. (rus)
18. Butt Y.M., Mayer A.A., Varshal B.G. Gidratatsiya mineralogicheskikh sostavlyayushchih domennykh shlakov [Hydration of mineralogical components of blast furnace slags] in the book "Issues of slag processing". Chelyabinsk, 1960. 256 p. (rus)
19. Gorshkov V.S., Aleksandrov S.E. et al. Kompleksnaya pererabotka i ispol'zovanie metallurgicheskikh shlakov v stroitel'stve [Complex processing and use of metallurgical slags in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985, 273 p. (rus)
20. Gemmerling G.V., Tsimermanis L.B. Shlakopemzobeton. Moscow: Stroyizdat. 1985. 130 p. (rus)
21. Patent RF № RU 2087438 C1. Ustanovka dlya proizvodstva osteklovannogo poristogo graviya [Installation for the production of glazed porous gravel]. Panchenko V.F., Francenyuk I.V., Denisov G.A., Shkol'nik Y.Sh., Yarmakovskiy V.N., Kadancev N.V., Korotaev A.S. BI from 20.08.1997. (rus)
22. Yarmakovskiy V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes and their application. International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. Pp. 363-373.

### Информация об авторах:

#### **Ярмаковский Вячеслав Наумович**

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Энергоресурсосберегающие легкие бетоны и конструкции», член экспертного совета РАН (отделение химии и новых наук о материалах).  
E-mail: [yarmakovsky@yandex.ru](mailto:yarmakovsky@yandex.ru)

#### **Кадиев Давид Заурбекович**

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Энергоресурсосберегающие легкие бетоны и конструкции».  
E-mail: [davidkadiiev@bk.ru](mailto:davidkadiiev@bk.ru)

### Information about authors:

#### **Yarmakovsky Vyacheslav N.**

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, candidate in of technical sciences, chief researcher of the laboratory “Energy-resource-saving lightweight concretes and structures”, member of the Russian Academy of Sciences expert council (Department of chemistry and new materials Sciences).

E-mail: [yarmakovsky@yandex.ru](mailto:yarmakovsky@yandex.ru)

#### **Kadiiev David Z.**

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, graduate student, junior researcher of the laboratory “Energy-resource-saving lightweight concretes and structures”.

E-mail: [davidkadiiev@bk.ru](mailto:davidkadiiev@bk.ru)