

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАЛОКЛИНКЕРНЫЕ ВЯЖУЩИЕ
ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
И КОНСТРУКЦИОННО-ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ**

**LOW-CLINKER COMPOSITE BINDERS
FOR INSULATING
AND STRUCTURAL-INSULATING LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETES**

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, Д.З. КАДИЕВ

V.N. YARMAKOVSKY, D.Z. KADIEV

**(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук)**

(Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)

E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Результаты исследований и практический опыт применения показывают, что теплоизоляционные легкие бетоны существенно более надежны в эксплуатации в сравнении с традиционными утеплителями (пенополистирольными, минераловатными плитами и т.п.), применяемыми в настоящее время в слоистых ограждающих конструкциях.

В статье сформулирована актуальность улучшения показателей тепло-технического качества таких бетонов для повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций, в которых они используются. Научно обоснована технологическая возможность реализации такой цели путем применения для легких бетонов рассматриваемого вида малоклинкерных композиционных вяжущих (МКВ). Последние характеризуются пониженными относительно традиционных цементных вяжущих значениями теплопроводности, сорбционной активности "цементного" камня и к тому же значительными (до двух раз) энергозатратами производства.

Научно обоснована эффективность применения МКВ и в конструкционно-теплоизоляционных легких бетонах.

The results of research and practical experience of application show that insulating lightweight aggregate concretes are more reliable in exploitation in comparison with traditional insulators (expanded polystyrene, mineral wool, etc.), currently used in multilayered enclosing structures.

The necessity of improving the thermal performance indicators of such concretes to increase the insulating properties of enclosing structures in which they are used is urgent. The technological capability of this aim realization by using in such lightweight aggregate concretes of low-clinker composite binders is shown in the article. They are characterized by significantly reduced in relation to traditional cement binders values of thermal conductivity, sorption activity of the cement stone and substantial (up to 2 times) energy consumption of production.

The efficiency of low-clinker composite binders application in structural-insulating lightweight aggregate concretes is scientifically proved.

Ключевые слова: малоклинкерные композиционные вяжущие, цементы, теплоизоляционные легкие бетоны, теплопроводность, сорбционная влажность.

Keywords: low-clinker composite binders, cements, insulating lightweight aggregate concretes, thermal conductivity, sorption humidity.

Разработка нового класса композиционных вяжущих – низкоэнергоемких в производстве малоклинкерных низкотеплопроводных и низкосорбционноактивных впервые была начата в лаборатории Легкие бетоны и ограждающие конструкции НИИЖБ около 20 лет назад для конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов (керамзитобетон, шлакопемзобетон и др.), широко применяемых в то время в однослойных ограждающих конструкциях. Были выполнены анализ и обобщение литературных данных в этой области и первые теоретические [1] и патентные исследования [2], [3]. Затем исследования были продолжены в лаборатории Энергоресурсосберегающие легкие бетоны и конструкции НИИСФ РАССН [4...6]. При этом исходили из того, что цементный камень, составляющий 25...40% от общего объема умеренно поризованного (объем воздухововлечения – 10...12%) конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона, является наиболее теплопроводным его компонентом. По обобщенным данным различных исследователей коэффициент теплопроводности (λ) портландцементного камня составляет от 0,56 до 0,72 Вт/м²С, в то время как величина λ зерна пористых заполнителей различных видов и разной плотности – от 0,15 до 0,3 Вт/м²С.

Применение малоклинкерных композиционных вяжущих (МКВ) эффективно в конструкционно-теплоизоляционных легких бетонах, применяемых для неармированных изделий, в частности для стеновых блоков. Особенно эффективно применение МКВ в теплоизоляционных легких бетонах, применяемых для сборного варианта изделий (например, в теплоизоляционных плитах), а также для монолитной теплоизоляции ограждающих конструкций, в частности наружных стен зданий, возводимых в несъемной опалубке [7], [8]. Для таких бетонов не регламентируется содержание портландцементного клинкера с позиций обеспечения пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре, а именно: не регламентируется условие необходимости

поддержания щелочной среды в порах бетона ($pH \geq 11,8$). Очевидно, что применение в таких бетонах портландцемента никоим образом не рационально ни с позиций экономических, ни с позиций обеспечения требуемых показателей теплотехнического качества, учитывая отмеченную выше относительно высокую теплопроводность цементного клинкера.

Актуальность разработки малоклинкерных композиционных вяжущих для конструкционно-теплоизоляционных и особенно для теплоизоляционных легких бетонов определяется также существенно пониженными (до двух раз) энергозатратами на их производство. Действительно, на обжиг клинкера бездобавочного портландцемента активностью 40...50 МПа расходуется в среднем 220 кг условного топлива (у.т.), а на МКВ той же активности со значительно меньшим клинкерной составляющей – не более 110 кг у.т.

Далее следует кратко остановиться на тенденциях развития вяжущих для теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов в мировой практике. Так, в статье Иоахима Хардера [9] отмечается, что в мировом производстве наблюдается значительное снижение средней доли клинкерного цемента. В 1990 г. она составляла 0,90 кг клинкера на 1 кг портландцемента, а к 2005 г. снизилась до 0,80 кг клинкера на 1 кг портландцемента. Это говорит о том, что на долю 0,20 кг на 1 кг цемента приходится различные основные и вспомогательные компоненты, которые называют присадками или добавками при совместном помоле клинкера с этими компонентами. Одна из наиболее важных причин широкого использования подобных присадок и добавок – это рыночный спрос на специальные марки цемента, а также их экономичное и экологически относительно чистое производство с использованием технологий образований с существенно сниженным выбросом CO₂ в атмосферу за счет снижения доли клинкера, получаемого при обжиге известняка.

В дополнение к вышеизложенному целесообразно отметить следующее. В США и Канаде, как показано в [10], в подавляющем большинстве производятся цементы с обязательным применением активных минеральных добавок из продуктов переработки техногенных образований, замещающих значительную долю клинкера. При этом, в отличие от цементной индустрии РФ, производится несколько десятков видов цементных вяжущих с различными специальными свойствами, соответствующими конкретной области применения. Например, в производстве легкобетонных блоков для стеновой кладки применяются так называемые "cements for masonry units", характеризующиеся повышенными показателями теплотехнического качества при значительной (до 30...50%) экономии клинкерной составляющей.

При разработке МКВ, изготавливаемых, главным образом, на основе химически взаимосочетаемых многотоннажных техногенных образований и продуктов их переработки, авторы статьи исходили из следующих основных предпосылок.

1. Улучшение теплофизических свойств МКВ реально и наиболее эффективно возможно за счет включения в вещественный состав такого относительно низкотеплопроводного и низкосорбционноактивного компонента, как продукт переработки расплава металлургического шлака доменного или ферросплавного производства (силикомарганца или ферромарганца), а также продукта переработки расплава электротермофосфорного шлака в форсированном режиме охлаждения, обеспечивающем преимущественное содержание в гранулированном шлаке аморфизированной фазы.

2. Кроме действия такого благоприятного фактора, как соответствующий фазовый состав, пониженную теплопроводность композиционного вяжущего с гидравлически активным молотым металлургическим или электротермофосфорным граншлаком должно обеспечивать относительно повышенное содержание продуктов гидратации – мелкокристаллических низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(B), а также низкоосновных гидроалюминатов типа C_2AH_8 .

3. Преимущество в относительно пониженной теплопроводности мелкокристаллических структур затвердевших вяжущих, как и структур в основном аморфизированных, очевидно, можно объяснить известным в теплофизике дисперсных систем "эффектом пробега фононов ближнего порядка". Для этого следует исходить из следующей формулы теплопроводности Т. Пайерлса [11]:

$$\lambda = \frac{1}{3} \ell_{\text{cp}} UC, \quad (1)$$

где ℓ_{cp} – средний пробег фононов (квазичастиц энергии связанных тепловых колебаний узлов решетки твердого тела); U – скорость распространения фононов; C – объемная теплоемкость.

Величина ℓ_{cp} зависит от процесса рассеяния фононов в структурной решетке твердого тела: чем выше интенсивность рассеяния, тем меньше длина пробега фононов и тем выше тепловое сопротивление кристалла. В аморфизированных или стеклообразных материалах, как у значительно менее организованных структур по сравнению с кристаллическими, имеющих ближний порядок расположения атомов, интенсивность рассеяния фононов выше и, следовательно, меньше теплопроводность. В связи с этим можно полагать, что вяжущие с подавляющим содержанием мелкокристаллических низкоосновных гидросиликатов кальция (так называемые белитовые цементы или композиционные вяжущие, значительную долю в которых занимает добавка бокситового шлака, в минералогическом составе которого доминирует белит – C_2S [4]) имеют преимущество в низкой теплопроводности "цементного камня" в сравнении с вяжущими с преобладающим содержанием основных гидросиликатами кальция C_3S , то есть с алитовыми цементами, в частности клинкерными портландцементами.

Рассмотрим результаты исследований.

1. Прежде всего целесообразно отметить результаты исследований по влиянию химического состава компонентов МКВ из металлургических шлаков на их фазовый состав и теплопроводность. В УралНИИСтром-

проекте были проведены исследования [12], по изучению теплопроводности полусинтетических шлаковых стекол системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$. Результаты их представлены на двух треугольных диаграммах (рис. 1

– влияние химического состава полусинтетических шлаковых стекол системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ на величины: а) плотности γ_0 , г/см^3 ; б) коэффициента теплопроводности λ_0 , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$).

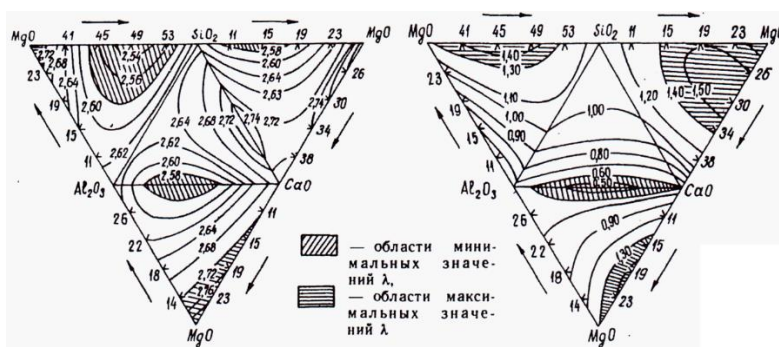


Рис. 1

Анализ этих результатов показывает: если плотность шлаковых стекол (γ_0) изменяется в зависимости от их минералогического состава довольно незначительно (от 2,54 до 2,76 т/м^3 , то есть только на 8,7%), то изменение их коэффициента теплопроводности (λ_0) весьма существенно – от 0,50 до 1,50 $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$. При этом следует отметить, что минимальные значения коэффициента теплопроводности наблюдаются на линии $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, а максимальные – при частичной замене CaO и SiO_2 на MgO .

2. Что касается влияния минералогического и фазового составов цементного камня на его теплопроводность, то механизм этого влияния можно представить следующим образом.

Известно, что силикатная фаза затвердевшего цементного клинкера (ЦК) имеет отрицательный поверхностный заряд, алюминатная и алюмоферритная – положительный. Если предположить, что энергия пробега фононов имеет электрическую природу, то есть отрицательный заряд, то можно ожидать, что, попадая в силикатную фазу цементного камня, она не только не теряет своей силы, но и приумножается. Из этого следует, что силикатная фаза хорошо проводит тепловой поток. При встрече с алюминатной и алюмоферритной фазами заряды фононов компенсируются (то есть уменьшаются в зависимости от объема и морфоло-

гии положительно заряженной алюминатной структуры).

Если силикатная фаза морфологически представлена в основном в виде игольчатых и волокнистых кристаллов и трубочек, то алюминатная и алюмоферритная – в виде гексагональных пластин и многоугольников, размер которых порой на 2-3 порядка меньше размера частиц силикатной фазы. Этим, скорее всего, и объясняется значительно большая степень рассеяния фононов в структурной решетке алюминатной и алюмоферритной фаз цементного камня в сравнении с силикатной его фазой. При этом, чем выше интенсивность рассеяния, тем меньше длина пробега фононов и соответственно тем выше тепловое сопротивление кристалла.

Эта гипотеза подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных в 2007-2009 гг. СибАДИ при участии НИИСФ по влиянию относительного содержания основных минералов цементного камня на его коэффициент теплопроводности ($\lambda_{\text{ЦК}}$). Действительно, анализ полученных результатов показал, что относительное повышение содержания алита C_3S приводит к увеличению $\lambda_{\text{ЦК}}$. С уменьшением содержания C_3S и соответствующим увеличением C_2S , алюмината кальция C_3A и алюмоферрита кальция C_4AF теплопроводность ЦК уменьшается. Наиболее значимое влия-

ние на $\lambda_{\text{ЦК}}$ оказывает содержание алюмината кальция C_3A .

3. В результате проведенных исследований по определению влияния относительного содержания основных минералов цемента на теплопроводность ЦК рассчитаны уравнения регрессии, устанавливающие зависимость величины $\lambda_{\text{ЦК}}$ от относительного содержания основных минералов в портландцементе C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF . Анализ полученных результатов показал, что содержание алита C_3S действительно приводит к увеличению $\lambda_{\text{ЦК}}$. С уменьшением содержания C_3S и соответствующим увеличением содер-

$$\lambda_{\text{эф}} = [(0,427 + (0,15\text{C}_3\text{S} - 0,12\text{C}_2\text{S} - 0,45\text{C}_3\text{A} - 0,38\text{C}_4\text{AF}) \cdot 10^{-2}) \cdot (1 - V_{\text{в}}) + (\lambda_{\text{в}} + \varepsilon \text{C}_0 \theta d) V_{\text{в}}], \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной теплопроводности бетона, Вт/(м·°К); C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF – относительное (%) содержание основных минералов цемента; $\lambda_{\text{в}} = 0,024$ Вт/(м·°К) – кондуктивная теплопроводность неподвижного воздуха в закрытых порах при температуре 20 °С; $V_{\text{в}}$ – объем пор, содержащихся в легком бетоне и проводящих тепловой поток, доли единиц; $\varepsilon = 0,91$ – приведенная степень черноты бетона; $\text{C}_0 = 5,77$ Вт/(м²·°К) – коэффициент излучения бетона; $\theta = 1$ – температурный коэффициент при температуре 20 °С; d – средний диаметр пор в структуре бетона, м.

5. Возможное снижение прочности (активности) композиционного вяжущего за счет замещения портландцементного клинкера менее гидравлически активным шлаком или другим компонентом такой же активности из техногенных образований (ТО) здесь компенсируется включением в состав этого вяжущего вместе с молотым доменным граншлаком (заменившем часть цементного клинкера) другого компонента, химическое взаимодействие которого со шлаком приведет к созданию таких новообразований, которые обеспечат требуемое (при сокращении расхода цементного клинкера) повышение структурной прочности ЦК без ухудшения его теплофизических свойств. Таким компонентом, как показали исследования Павлодарского технического университета, проведенные совместно с НИИСФ [4], может быть бокситовый шлак (БШ) – техногенное об-

разования C_2S , алюмината кальция C_3A и алюмоферрита кальция C_4AF величина $\lambda_{\text{ЦК}}$ уменьшается. Наиболее значимое влияние на нее оказывает содержание алюмината кальция C_3A .

Величина $\lambda_{\text{ЦК}}$ на алитовом цементе равна 0,435 Вт/(м·°К), на белитовом 0,368 Вт/(м·°К), на алюминатном – 0,351 Вт/(м·°К), на алюмоферритном – 0,397 Вт/(м·°К).

4. Получена формула для расчета эффективной теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ поризованного теплоизоляционного легкого бетона в зависимости от содержания основных минералов в цементе и пористости бетона:

разование глиноземного производства, представленное минералогически, в основном белитом C_2S и трехкальциевым алюминатом C_3A при значительном содержании щелочных оксидов (до 7...10%). Последнее способствовало развитию процесса реакции щелочей БШ с минералами доменного граншлака (по типу шлакощелочного вяжущего) и, как следствие, требуемому повышению структурной прочности затвердевшего смешанного вяжущего. Сохранению при этом или даже улучшению показателей теплотехнического качества вяжущего такой разновидности способствовала высокая внутризерновая пористость БШ и мелкопористая структура продуктов реакции щелочей БШ с доменным граншлаком – еще одним компонентом МКВ.

Были разработаны малоклинкерные (расход цементного клинкера от 10% до 30% по массе вяжущего) композиционные полимеризованные (с помощью добавки-суперпластификатора С-3) шлаковые вяжущие (МКВ) марок М300-М400. В проведенных экспериментах в качестве сырьевых компонентов использовались: портландцементный клинкер Липецкого цементного завода, доменный гранулированный шлак Новолипецкого меткомбината с содержанием стеклофазы 85...90% и суперпластификатор С-3 в порошкообразном состоянии.

Оптимальные составы МКВ определялись в результате выполненного методом математического планирования эксперимен-

та. Результаты видны на рис. 2 – номограмма зависимости прочности на сжатие (R_{28}) в 28 суток нормально-влажностного твердения, коэффициента теплопроводности в сухом состоянии (λ_0) и приращения коэф-

фициента теплопроводности на 1% влажности ($\Delta\lambda$) МКВ от расхода цементного клинкера (ЦК) и расхода суперпластификатора С-3 при тонкости помола сырьевой смеси $S=3250 \text{ см}^2/\text{г}$.

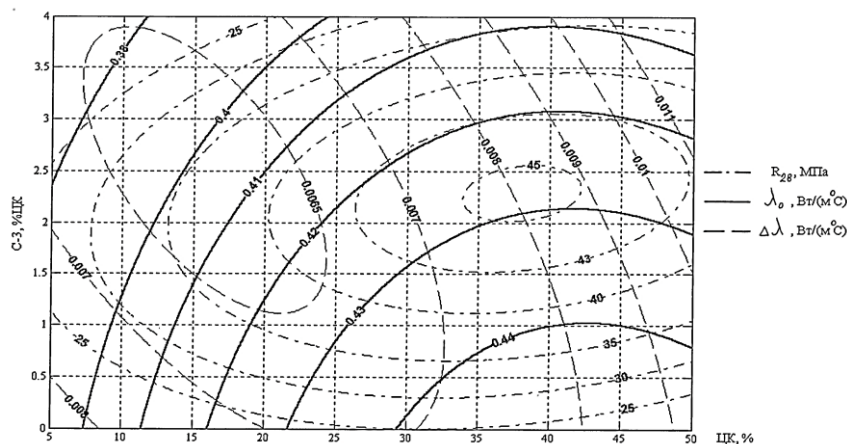


Рис. 2

Анализ данных номограмм показывает, что в соответствии с вышеизложенными гипотезами значения коэффициента теплопроводности в сухом состоянии (λ_0) МКВ, приращения его на 1% влажности ($\Delta\lambda$), значения сорбционной влажности ω_c при $\phi_v=97\%$ тем ниже, чем ниже содержание цементного клинкера в МКВ активностью, например, 40 МПа (разница составляет соответственно 28...32%, 27...41% и 68%).

Эффективность МКВ была проверена в лаборатории Энергоресурсосберегающих легких бетонов и конструкций НИИСФ при использовании в теплоизоляционном полистиролбетоне (ПСБ) марки по плотности D400 в сравнении с аналогом – полистиролбетоном, изготовленным на портландцементе. Коэффициент теплопроводности ПСБ, изготовленного на основе МКВ активностью 40 МПа при 25%-ном содержании цементного клинкера, оказался ниже в сравнении с аналогичной характеристикой ПСБ на портландцементе той же активности: для сухого состояния бетона (λ_0) на 22%, а для состояния равновесной влажности λ_B (условие Б по СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003", Таблица Т1 "Расчетные теплотехнические показатели строительных материалов и изделий") на 37%. При этом сорб-

ционная влажность бетона (ω_c) при $\phi_v=97\%$ была ниже на 47%.

Результаты исследований в области технологии и теплофизических свойств теплоизоляционного полистиролбетона, изготовленного с использованием МКВ в качестве вяжущих, послужили научной базой для разработки в НИИСФ стандарта организации СТО 02495359-4.001–2016. Модифицированный полистиролбетон. Общие технические условия [13].

Применение конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов, изготавливаемых с использованием композиционных вяжущих типа МКВ (так называемых "composite binders"), отражено в разработанном рабочей комиссией Международной федерации по бетону и железобетону fib "Task Group 8.1" (в составе коллектива авторов – В.Н. Ярмаковский) Руководством по проектированию конструкций из легких бетонов [14]. Последнее использовано при разработке новой редакции Международных (fib) норм по проектированию конструкций из бетона и железобетона – Model Code 90, а затем – Model Code 2010.

Имеются и другие примеры разработок НИИСФ по эффективному использованию продуктов переработки техногенных образований металлургии, химическое взаимо-

действие которых с минералами цементного камня позволило создать номенклатуру малоклинкерных композиционных вяжущих с пониженными относительно традиционных цементных вяжущих теплопроводностью и сорбционной активностью "цементного" камня.

ВЫВОДЫ

1. Разработан для применения в теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонах принципиально новый класс довольно широкой номенклатуры низкоэнергоемких в производстве малоклинкерных композиционных вяжущих (МКВ), изготавливаемых с использованием химически взаимосочетаемых с минералами цементного камня продуктов переработки техногенных образований различных видов. Цементный камень МКВ отличается от портландцементного камня при той же активности вяжущего существенно пониженными значениями коэффициента теплопроводности и сорбционной влажности.

2. При значительной экономии портландцементного клинкера (от 30 до 60%) такие вяжущие имеют достаточно высокую для конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных легких бетонов активность (40...50 МПа) и при этом характеризуются существенно повышенными показателями теплотехнического качества: пониженными величинами коэффициента теплопроводности и сорбционной влажности "цементного камня" при сохранении его прочности в сравнении с портландцементным камнем. Кроме того, МКВ имеют в сравнении с цементными вяжущими той же активности явные преимущества в пониженных почти в два раза энергозатратах на их производство и в экологической чистоте производства, обусловленной снижением выбросов CO₂ в атмосферу при обжиге известняка для получения клинкера за счет сниженной его доли в вяжущем.

3. Результаты исследований особо легких теплоизоляционных бетонов, изготовленных с использованием МКВ (в частности, особо легкого теплоизоляционного полистиролбетона), в сравнении с использованием бездобавочного портландцемента ак-

тивностью 40...50 МПа показали явное преимущество в мелкопористой структуре растворной части такого бетона с пониженным содержанием капиллярных пор. Последнее обусловлено пониженной нормальной плотностью малоклинкерного цементного теста МКВ и соответственно относительно низкой водопотребностью бетонной смеси. Отсюда – преимущество в теплофизических свойствах легкого бетона на таком вяжущем. Таким образом, подтверждена высокая теплотехническая эффективность разработанных МКВ при явных преимуществах в пониженных энергозатратах и экологической чистоте производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярмаковский В.Н., Петров В.Г., Левит-Гуревич Л.К. Модель численного решения уравнения Лапласа для определения коэффициента теплопроводности бетона // III-я научн.-практич. конф.: Проблемы строительной теплофизики, системы микроклимата и энергосбережения в зданиях // Сб. докл., НИИСФ. – М., 1998. С.125...131.
2. Авторское свидетельство на изобретение SU 1733413 A1. "Вяжущее" БИ №18, 15.05.1992. Авторы: Ярмаковский В.Н., Тянь В.А., Торпишев Ш.К. и др.
3. Патент на изобретение РФ №2160132, гос. регистр, от 20.06.2001 г. Смесь для теплоизоляционных изделий. Авторы: Ярмаковский В.Н., Крылов Б.А.
4. Ярмаковский В.Н., Торпишев Ш.К. О научных основах создания класса низкотеплопроводных композиционных вяжущих // Научн. тр. РААСН: Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2009 году. Т. 2. – Москва-Иваново, 2010. С.193...201.
5. Шубин И.Л., Умнякова Н.П., Ярмаковский В.Н. Особо легкие бетоны новых модификаций – для решения задач ресурсоэнергосбережения. В защиту отечественных технологий // Технологии строительства. – 2012, № 4. С. 42...46.
6. Ярмаковский В.Н. Композиционные вяжущие для легких бетонов с высокими показателями теплотехнического качества // Альбом инновационных разработок РААСН. – 2018. С.60...62.
7. Рекомендации по расчету и проектированию ограждающих конструкций с применением монолитного теплоизоляционного полистиролбетона с высокопоризованной и пластифицированной матрицей. – Правительство Москвы, Москомархитектура, 2006. С. 53.
8. Ярмаковский В.Н. К научным основам создания монолитной теплоизоляции из особо легких бетонов с высокопоризованной и пластифицированной матрицей // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архи-

тектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году // Сб. научн. тр. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. С.459...466.

9. Joahim Harder. Clinker substitutes in the cement industry // Cement Lime Gypsum. International Journal ZKG. – №2, 2006. P. 26...31.

10. Javed I. Bhatti, Paul D. Tennis. U.S. and Canadian Cement Characteristics // Research & Development Information. Portland Cement Association. – Skokie, Illinois. 2008. P. 45.

11. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматиздат, 1962.

12. Зяткова Л.Р., Чернявский И.Я., Миллер С.Н. Теплопроводность полусинтетических шлаковых стекол системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ // Сб. научн. тр. УралНИИСтромпроекта: Использование промышленных отходов в производстве строительных материалов. – Челябинск, 1984. С. 3...9.

13. Стандарт НИИСФ РААСН СТО 02495359-4.001–2016. Модифицированный полистиролбетон. Общие технические условия. – М., 2016.

14. Bulletin 8 of Fédération internationale du béton (fib). "Lightweight aggregate concrete. Recommended extensions to Model Code 90". Guide, state-of-art report // Federal Institute of technology. – Lausanne, Switzerland. P. 120.

REFERENCES

1. Yarmakovskiy V.N., Petrov V.G., Levit-Gurevich L.K. Model' chislenogo resheniya uravneniya Laplasya dlya opredeleniya koeffitsienta teploprovodnosti betona // III-ya nauchn.-praktich. konf.: Problemy stroitel'noy teplofiziki, sistemy mikroklimata i energosberezheniya v zdaniyakh // Sb. dokl., NIISF. – M., 1998. S.125...131.

2. Avtorskoe svidetel'stvo na izobretenie SU 1733413 A1. "Vyazhushchee" BI №18, 15.05.1992. Avtory: Yarmakovskiy V.N., Tyan V.A., Torpishchev Sh.K. i dr.

3. Patent na izobretenie RF №2160132, gos. registr, ot 20.06.2001 g. Smes' dlya teploizolyatsionnykh izdeliy. Avtory: Yarmakovskiy V.N., Krylov B.A.

4. Yarmakovskiy V.N., Torpishchev Sh.K. O nauchnykh osnovakh sozdaniya klassa nizkoteploprovodnykh kompozitsionnykh vyazhushchikh // Nauchn. tr. RAASN: Fundamental'nye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2009 godu. T. 2. – Moskva-Ivanovo, 2010. S. 193...201.

5. Shubin I.L., Umnyakova N.P., Yarmakovskiy V.N. Osobo legkie betony novykh modifikatsiy – dlya resheniya zadach resursoenergoberezheniya. V zashchitu otechestvennykh tekhnologiy // Tekhnologii stroitel'stva. – 2012, № 4. S. 42...46.

6. Yarmakovskiy V.N. Kompozitsionnye vyazhushchie dlya legkikh betonov s vysokimi pokazatelyami teplotekhnicheskogo kachestva // Al'bom innovatsionnykh razrabotok RAASN. – 2018. S.60...62.

7. Rekomendatsii po raschetu i proektirovaniyu ograzhdayushchikh konstruksiy s primeneniem monolitnogo teploizolyatsionnogo polistirolbetona s vysokoporizovannoy i plastifitsirovannoy matritsey. – Pravitel'stvo Moskv, Moskomarkhitektura, 2006. S. 53.

8. Yarmakovskiy V.N. K nauchnym osnovam sozdaniya monolitnoy teploizolyatsii iz osobo legkikh betonov s vysokoporizovannoy i plastifitsirovannoy matritsey // Fundamental'nye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2012 godu // Sb. nauchn. tr. – Volgograd: VolgGASU, 2013. S.459...466.

9. Joahim Harder. Clinker substitutes in the cement industry // Cement Lime Gypsum. International Journal ZKG. – №2, 2006. P. 26...31.

10. Javed I. Bhatti, Paul D. Tennis. U.S. and Canadian Cement Characteristics // Research & Development Information. Portland Cement Association. – Skokie, Illinois. 2008. P. 45.

11. Chudnovskiy A.F. Teplofizicheskie kharakteristiki dispersnykh materialov. – М.: Fizmatizdat, 1962.

12. Zyat'kova L.R., Chernyavskiy I.Ya., Miller S.N. Teploprovodnost' polusinteticheskikh shlakovykh stekol sistemy $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ // Sb. nauchn. tr. UralNIISStromprojekta: Ispol'zovanie promyshlennykh otkhodov v proizvodstve stroitel'nykh materialov. – Chelyabinsk, 1984. S. 3...9.

13. Standart NIISF RAASN SТО 02495359-4.001–2016. Modifitsirovanny polistirolбетон. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – М., 2016.

14. Bulletin 8 of Fédération internationale du béton (fib). "Lightweight aggregate concrete. Recommended extensions to Model Code 90". Guide, state-of-art report // Federal Institute of technology. – Lausanne, Switzerland. P. 120.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 18.06.19.