



Рудченко Д. Г.



Сердюк В. Р.

**Рудченко Д. Г.**, канд. техн. наук,  
генеральний директор ТОВ «Аерок»,  
08700, Київської обл., м. Обухів, вул. Промислова, 6,  
✉ aeroc@aeroc.ua ☎ +38 (044) 391 31 92.

**Сердюк В. Р.**, доктор техн. наук,  
професор кафедри будівництва, міського господарства і архітектури,  
Вінницький національний технічний університет,  
21000, Вінницька обл., м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
☎ +38 (0432) 560 848.

**Dmitrii Rudchenko**, Ph.D.,  
General Director (manager), LLC Aeroc,  
st. Promislova, 6, Obukhov, 08700,  
✉ aeroc@aeroc.ua ☎ +38 (044) 391 31 92.

**Vasyl Serdyuk**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
of the Department of Construction, Urban Economy and Architecture,  
Vinnitsa National Technical University,  
Khmelnitsky Highway, 95, Vinnytsia, Vinnytsia region, 21000,  
☎ +38 (0432) 560 848.

## ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

### ШЛЯХИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТА ВИРОБНИЦТВІ ГАЗОБЕТОНУ НИЗКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ENERGY SAVING ASPECTS IN PRODUCTION AND USE OF LOW-DENSITY AERATED CONCRETE

**Аннотация.** В статье приведен анализ нормативных требований, касающихся термического сопротивления стен современных зданий. Сравнение нормативных требований близких к Украине по климатическим условиям стран Балтии и Финляндии свидетельствует о значительном отставании показателей украинских нормативов.

На основе анализа структуры стеновых материалов, производимых в Украине, показано снижение объемов производства керамического строительного кирпича, керамзита, которые потеряли свои позиции на строительном рынке из-за высокой энергоёмкости производства и низких теплофизических свойств на стадии эксплуатации и были вытеснены автоклавным газобетоном.

Показаны тенденции производства автоклавного газобетона в Украине.

Высокий уровень технологии производства отечественного газобетона подтверждается качеством продукции компании «Аэрок», которая занимает ключевые показатели по производству автоклавного газобетона низкой плотности и высокой прочности. Компания первой на территории постсоветского пространства начала массовое производство теплоизоляционного газобетона марки D150, не имеющего аналогов в СНГ, и газобетона марки D300 с классом прочности на сжатие C2,0. Показана структура производства газобетона по плотности компании «Аэрок» и основные направления снижения расхода цемента при производстве газобетона за счет использования доменного гранулированного шлака и природного гипсового камня. Приведена зависимость увеличения расхода цемента в зависимости от снижения плотности газобетона.

Раскрыты особенности совершенствования качества автоклавного газобетона на примере продукции компании «Аэрок» и показаны пути повышения карбонизационной стойкости автоклавного газобетона из-за низкой плотности и высокой паропроницаемости.

**Ключевые слова:** стеновые материалы, энергоэффективность газобетон, теплоизоляция.

**Анотація.** У статті наведено аналіз нормативних вимог, що стосуються термічного опору стін сучасних будівель. Порівняння нормативних вимог близьких до України за кліматичними умовами країн Балтії та Фінляндії свідчить про значне відставання показників українських нормативів.

На основі аналізу структури стінових матеріалів, вироблених в Україні, показано зниження обсягів виробництва керамічної будівельної цегли, керамзиту, які втратили свої позиції на будівельному ринку через високу енергоємність виробництва і низьких теплофізичних властивостей на стадії експлуатації і були витіснені автоклавним газобетоном.

Показані тенденції виробництва автоклавного газобетону в Україні.

Високий рівень технології виробництва вітчизняного газобетону підтверджується якістю продукції компанії «Аерок», яка займає ключові показники по виробництву автоклавного газобетону низької щільності і високої міцності. Компанія першою на території пострадянського простору розпочала масове виробництво теплоізоляційного газобетону марки D150, що не має аналогів в СНД, і газобетону марки D300 з класом міцності на стиск C2,0. Показана структура виробництва газобетону по щільності компанії «Аерок» і основні напрямки зниження витрати цементу при виробництві газобетону за рахунок використання доменного гранульованого шлаку і природного гіпсового каменю. Наведено залежність збільшення витрати цементу в залежності від зниження щільності газобетону.

Розкрито особливості вдосконалення якості автоклавного газобетону на прикладі продукції компанії «Аерок» та показані шляхи підвищення карбонізаційної стійкості автоклавного газобетону через низьку щільність і високу паропроникність.

**Ключові слова:** стінові матеріали, енергоефективність газобетон, теплоізоляція.

**Annotation.** The article provides an analysis of the regulatory requirements regarding the thermal resistance of the walls of modern buildings. Comparison of regulatory requirements close to Ukraine in terms of climatic conditions in the Baltic States and Finland indicates a significant lag in the indicators of Ukrainian standards.

Based on the analysis of the structure of wall materials produced in Ukraine, a decrease in the volume of production of ceramic building bricks, expanded clay, which have lost their positions in the construction market due to the high-energy intensity of production and low thermo physical properties at the operation stage, and were displaced with autoclaved aerated concrete, is shown.

The trends in the production of autoclaved aerated concrete in Ukraine are shown. The high level of technology for the production of domestic aerated concrete is confirmed by the quality of the products of "Aeroc" company, which occupies the key indicators for the production of autoclaved aerated concrete of low density and high strength. On the territory of the post-Soviet countries the company was the first to start mass production of heat-insulating aerated concrete of the D150 brand, which has no analogues in the CIS, and aerated concrete of the D300 brand with a compressive strength class of C2.0. The structure of the production of aerated concrete by density of "Aeroc" company and the main directions of reducing the consumption of cement in the production of aerated concrete using granulated blast furnace slag and natural gypsum stone are shown. The dependence of the increase in cement consumption depending on the decrease in the density of aerated concrete is given.

The features of improving the quality of autoclaved aerated concrete on the example of the products of the company "Aeroc" are revealed and ways to increase the carbonization resistance of autoclaved aerated concrete due to low density and high vapor permeability are shown.

**Key words:** wall materials, energy efficiency aerated concrete, thermal insulation.

## Введение

На сегодняшний день относительные объемы строительства жилья ( $\text{м}^2/\text{чел}$  в год) в Украине в последние двадцать лет согласно официальной статистике в 2-3 раза ниже, нежели в других странах постсоветского пространства, таких как Беларусь, РФ и Казахстан.

Вместе с тем, в Украине, по аналогии с развитыми странами, увеличивается доля жилья в индивидуальных малоэтажных домах (до 3-х этажей), она составляет в последние годы примерно 50... 53%, в странах ЕС, США, Канады – более 75%. Строительство малоэтажного жилья требует в разы больше стеновых энергоэффективных материалов.

Перед строительной отраслью Украины, вполне очевидно, стоит две важнейшие задачи. Первая – это необходимость существенного увеличения объемов строительства жилья. Вторая, не менее важная задача, это утепление существующего жилищного фонда. На сегодняшний день более 90% жилищного фонда Украины нуждается в утеплении. Жилой фонд состоит из 240 тыс. многоквартирных и около 6,5 млн. частных домов. На содержание  $1\text{ м}^2$  жилой площади в Украине расходуется в 2,5-3 раза больше энергии, чем в развитых странах ЕС с такими же климатическими условиями.

## Подходы к разработке нормативной базы

Вполне объяснимо то, что при разработке нормативной базы в строительстве ориентация всегда делалась на нормативы богатой на углеводороды России. Сравнение нормативных требований близких к Украине по климатическим условиям стран Балтии и Финляндии свидетельствует о значительном отставании показателей украинских нормативов. Если термическое сопротивление для стен первой климатической зоны в Украине составляет  $3,3\text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$ , совмещенного перекрытия  $6,0\text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$  и окон  $0,75\text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$ , то в вышеуказанных странах аналогичные показатели почти в 2 раза выше и соответственно составляют для стены – 5,88, перекрытия – 11,1 и окна –  $1\text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$ . При таком раскладе «оболочка» украинского дома, построенного сегодня, много лет будет терять почти в 2 раза больше тепловой энергии в зимний период. Даже при выполнении требований самых последних строительных норм. Решение проблем энергосбережения как бы переносится на последующие поколения. При чем, новые украинские нормативные требования [1] были введены в действие совершенно недавно – с 1 января 2017 года. Парадоксальность ситуации состоит и в том, что профильное строительное министерство постоянно занимало «догоняющую» позицию в разработке нормативной базы, касающейся энергосбережения в строительстве.

Энергопотребление зданий в европейских странах после мирового энергетического кризиса 1974 года, когда цены на нефть увеличились в течение 2 лет в 3 раза, стало доминирующим критерием качества строитель-

ного проекта. В мировой строительной практике появилось большое количество зданий, микрорайонов, построенных на основе различных энергетических концепций. Наибольшую известность получили такие: энергоэффективное здание (energy efficient building), здание с низким энергопотреблением (low energy building), здание с нулевым использованием энергии (zero energy building), пассивное здание (passive building).

Среди применяемых в настоящее время стандартов «зеленых» зданий можно выделить стандарты «BREEAM», «LEED», «DGNB». В их основе лежат нормативы энергии, воды, строительных материалов, использования земельных участков и др. «Зеленые» здания широко используются странами ЕС, Северной Америкой, Азии, Австралии и др.

Совсем недавно Минрегионом подготовлено прогрессивное распоряжение, которое было рассмотрено и принято 29 января 2020 года на заседании правительства Украины. В нем предусмотрены мероприятия, направленные на стимулирование на протяжении 2020-2030 годов застройщиков и владельцев зданий к переходу на строительство новых и реконструкцию существующих зданий с соблюдением высоких стандартов энергоэффективности – зданий с приближенным к нулевому уровню потребления энергии (ППЭЗ). На первом этапе (2020-2025 годы) предусматривается создание нормативно-правовой базы, определения целей, увеличения количества таких зданий. На втором этапе (2025-2030 годы) должен состояться переход к обязательному соблюдению стандартов ППЭЗ по объектам строительства и зданиям, в которых осуществляется реконструкция. Такие здания по уровню энергопотребления будут относиться к классу энергоэффективности «А+». Стоимость энергообеспечения таких построек не должна превышать 25% по сравнению со средними показателями затрат на энергообеспечение жилых или общественных зданий соответственно.

Реализация принятых решений позволит Украине, по аналогии с практикой стран ЕС, переходить на новые принципы проектирования энергоэффективных зданий, которые способны полностью или частично обеспечить себя энергией. Это потребует, в первую очередь, совершенствования технологий производства стеновых строительных материалов в части снижения энергоемкости их производства и повышения их энергоэффективности на стадии эксплуатации.

Вполне очевидно, что первоочередным действием должно стать повышение показателей нормативных требований ДБН к термическому сопротивлению ограждающих конструкций.

Сокращение объема производства традиционного керамического кирпича по сравнению с 2007 годом составило более, чем в два раза (рис. 1). А если сравнить объемы производства 1991 года и 2018 года, то снижение производства становится 12 раз.

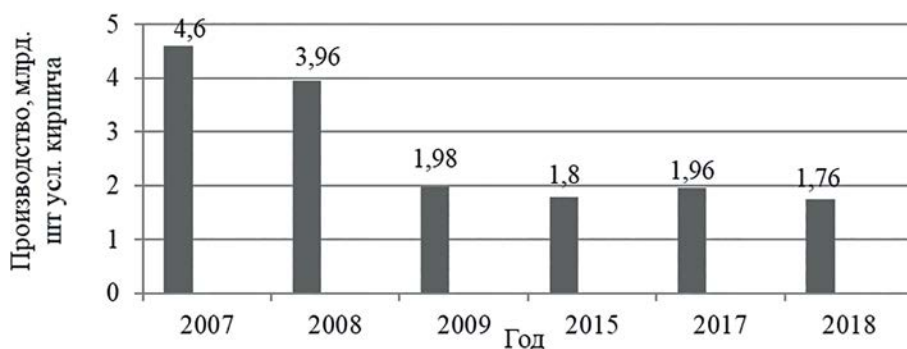


Рис. 1. Динамика производства керамического кирпича

Используемый поризованный керамический блок с коэффициентом теплопроводности 0,12-0,28 Вт/м·К, прочностью на сжатие 100-150 кгс/см<sup>2</sup> лишь частично восполняет потерю на строительном рынке традиционного керамического кирпича. По тем же причинам – из-за высокой энергетической составляющей при производстве и низких теплофизических характеристиках в условиях эксплуатации стремительно сократилось производство и использование керамзита и керамзитобетонных изделий.

Использование SIP-панелей для возведения жилых и коммерческих зданий в мире известно уже более 50 лет. В США, Канаде и Европе большая часть частных домов построено именно по SIP-технологии. В Украине эта технология пока не прижилась. Другие стеновые материалы – пенобетон, пустотные бетонные блоки с термовкладышами, арболитовые и опилкобетонные блоки, шлакоблоки, полистролбетонные блоки – не пользуются большим спросом у застройщиков. Освободившуюся нишу базовых стеновых материалов занял газобетон автоклавного твердения.

### Тенденции производства автоклавного газобетона

Автоклавный газобетон – относительно новый строительный материал. В 1960 году в бывшем СССР производилось примерно 100 тыс. м<sup>3</sup> пенобетона естественного твердения. В конце 60-х в начале 70-х годов прошлого века, было закуплено 10 современных, на то время, заводов по производству газобетона автоклавного твердения в Польше. Польша, в свою очередь, купила завод у шведской компании «Sirogex» с правом тиражирования оборудования, построила сеть заводов в своей стране, нарастив производственные мощности до 4 млн. м<sup>3</sup>, и экспортировала уже свои заводы в СССР, Чехию, Словакию и другие страны. В начале 70-х годов в СССР началось строительство новых заводов по производству автоклавного газобетона на отечественном оборудовании, и их количество достигло 96.

В конце 90-х пик объемов производства автоклавного газобетона в бывшем СССР составил 6,6 млн. м<sup>3</sup>. Стремительный рост производства изделий из газобетона начался в последние 15 лет во всех странах постсоветского пространства. Беларусь в 2014 году вышла на объём производства 3,2 млн. м<sup>3</sup>. При этом до 40% произведенного газобетона она экспортировала. РФ в последние годы производит 13...14 млн. м<sup>3</sup> в год при наличии установленной мощности 74 заводов в 17,42 млн. м<sup>3</sup> газобетона. В Украине объём производства автоклавного газобетона в 2019 году составлял 3,9 млн м<sup>3</sup>.

Высокий уровень технологии производства отечественного газобетона подтверждается качеством продукции компании «АЭРОК». Она первой на территории постсоветского пространства начала массовое производство теплоизоляционного газобетона марки D150, не имеющего аналогов в СНГ, и газобетона плотностью 300 кг/м<sup>3</sup> с классом прочности на сжатие C2,0.

В период с 2014 года по настоящее время производство теплоизоляционных панелей АЭРОК Energy плотностью 150 кг/м<sup>3</sup> составило 33 726 м<sup>3</sup>, а стеновых конструктивных теп-

лоизоляционных блоков АЭРОК D300 – 1 123 274 м<sup>3</sup>. На рис. 2 представлен график распределения выпуска продукции компании «АЭРОК» по плотностям.

Анализируя существующую практику стран ЕС и опыт АЭРОК, можно сделать вывод, что современные реалии требуют увеличения объёмов производства и применения конструктивно-теплоизоляционного газобетона плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup> и ограничение производства «тяжёлого» газобетона плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> и выше.

Последующее ожидаемое повышение нормативных требований к ограждающим конструкциям новых и существующих зданий потребует утепления стен негорючим минеральным экологически чистым утеплителем из газобетона D100-D150. Увеличение производства и применения теплоизоляционных газобетонов марки D100 и D150 обусловлено низким коэффициентом его теплопроводности (в сухом состоянии 0,045...0,055 Вт/(м·°C).

Автоклавный газобетон, по сравнению с традиционными стеновыми материалами, характеризуется более низкой энергоёмкостью производства и более эффективен на стадии эксплуатации. Его доля в структуре стеновых материалов в Украине составляет 53%, в Германии вместе с эффективной керамикой он занимает первые места, как стеновой материал. Вместе с тем, и его производство является весьма энергоёмким процессом, оно предусматривает автоклавную обработку при 190–195 °C в среде перегретого пара при давлении 1,2...1,4 МПа, помол песка, непрерывное его усреднение, использование энергоёмких вяжущих (цемента и извести), транспортные затраты и др.

### Снижение энергоёмкости производства автоклавного газобетона

На рис. 3 приведены основные направления снижения энергозатрат производства газобетона. Отдельные из них являются общепринятыми на всех современных заводах: использование энергии конденсата для подогрева воды, отопления; использование возвратного шлама; снижение плотности продукции.



Рис. 3. Некоторые направления снижения энергоёмкости производства автоклавного газобетона

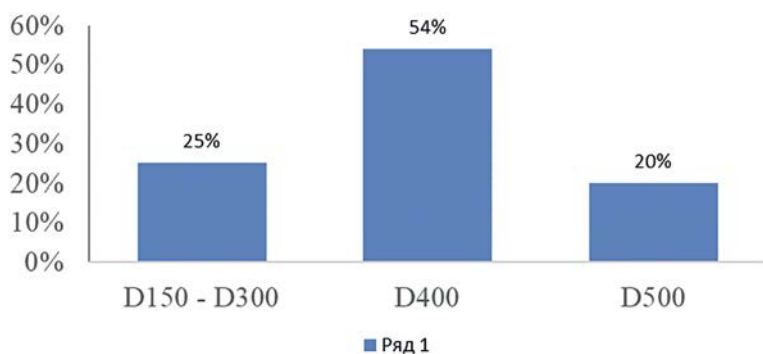


Рис.2. Распределение объёма выпуска газобетона «АЭРОК» по плотностям

### Энергосбережение при автоклавировании газобетона

В процессе автоклавной обработки гидроксид кальция взаимодействует с силикатными компонентами, что ведет к образованию гидросиликатов кальция и выделения энергии (80 кДж/кг для тоберморита и 45 кДж/кг для ксонотлита) [2]. В результате чего обеспечивается дополнительный прогрев газобетонной массы и высвобождение свободной тепловой энергии. Данную энергию возможно в дальнейшем использовать при внедрении энергосберегающих режимов автоклавной обработки, таких как перепуск пара, нагрев камер набора пластической прочности, подогрева воды затворения, хозяйственных целей и др.

Передовые производители газобетона максимально используют энергию экзотермии в процессе автоклавирования газобетона, исключая или минимизируя выбросы пара в атмосферу. При автоклавировании газобетонных изделий после выхода на режим изотермической выдержки давление в автоклаве повышается на 0,25... 0,3 кгс/см<sup>2</sup> (0,025... 0,03 МПа). Срабатывает система автоматического регулирования давления пара в автоклаве. Компания «АЭРОК», как и передовые европейские производители автоклавного газобетона, совершенствует работу автоклавного отделения, используя этот резервный источник экономии энергии.

### Эффективность снижения плотности газобетона

Мировые тенденции производства газобетона предусматривают снижение плотности газобетона при сохранении или даже повышении его прочности. На первый взгляд снижение плотности газобетона, например, с D600 до D300 обеспечивает последующее снижение материалоемкости примерно на 50% и дает большой эффект в экономии сырьевых материалов.

Но для производителя газобетона при производстве газобетона низкой плотности фактическая экономическая эффективность несколько иная. При снижении плотности газобетона толщина его межпоровых перегородок снижается, следовательно, возникает необходимость увеличения их прочности, а это возможно путем снижения В/Т отношения, увеличения расхода дорогостоящего вяжущего и оптимизации состава смеси.

На рис. 4 приведена зависимость «цементоемкости» газобетонных смесей в зависимости от плотности газобетона на примере производственных составов газобетона «АЭРОК».

Как видно из рис. 4, по мере снижения плотности газобетона стремительно увеличивается расход цемента на кг массы газобетона. Имеет место эффект «сообщающихся сосудов» – получая экономию энергии на стадии эксплуатации газобетона из-за низкой его плотности, необходимо увеличить потребление энергии на стадии его изготовления, увеличив «энергоёмкость» вяжущего.

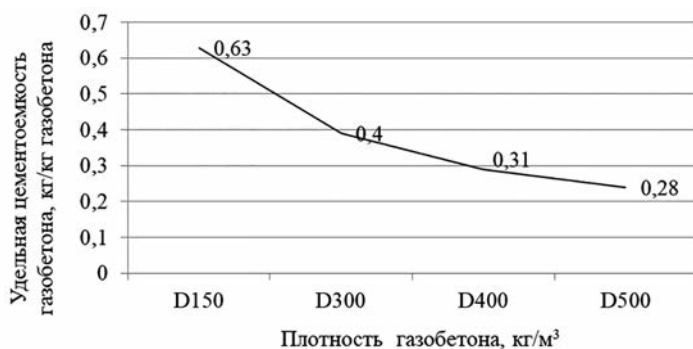


Рис. 4. Зависимость расхода цемента на кг массы газобетона в зависимости от его плотности

Наибольшие резервы снижения энергоёмкости производства автоклавного газобетона связаны со снижением расхода цемента и извести. Хотя температура обжига извести значительно ниже, чем цемента, в существующих реалиях парадоксальным является то, что стоимость извести для украинского производителя газобетона даже выше, нежели стоимость цемента.

### Экономия минерального вяжущего

Согласно [3] в качестве вяжущих для приготовления ячеистого бетона можно применять: портландцемент, шлакопортландцемент; известь-кипелку кальциевую; цементно-известковое (известково-цементное); известково-белитовое; высокоосновное зольное вяжущие; ДГШ совместно с активизаторами твердения; шлакощелочное, содержащее ДГШ. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что оптимальным есть использование смеси цемента и извести.

В процессе автоклавной обработки все виды вяжущих согласно [3] при правильном расчете состава газобетонной смеси и режимов автоклавной обработки обеспечивают высокую прочность силикатного камня и этому вопросу посвящено множество научных исследований.

Прочность автоклавного газобетона зависит не только от прочности новообразований силикатного камня, а при переходе на производство газобетона плотностью D400 и ниже в большей мере зависит от правильности макропор, их размера и однородности распределения ячеистой структуры.

На стадии формирования газобетонной смеси с различными видами вяжущего и минеральными добавками технологически необходимо учитывать многие технологические параметры смеси (расход компонентов и температуру смеси, сроки схватывания, вязкость смеси, соответствие сроков окончания газовойделения с началом схватывания смеси), которые обеспечивают образование качественной макроструктуры газобетона. В условиях промышленного производства автоклавного газобетона основные параметры смеси контролируются в автоматическом режиме с использованием специально разработанных программ.

Резательная технология производства автоклавного газобетона требует интенсивного прироста пластической прочности газобетонного сырца до автоклавной обработки. Пластическая прочность сырца должна быть достаточной для снятия бортов, кантования массива на 90 градусов и его калибровки. Передержка уже порезанных массивов до начала автоклавной обработки может приводить к снижению прочности автоклавированного газобетона до 30%.

### Применение доменного гранулированного шлака

Большой практический интерес для сокращения клинкерной составляющей автоклавного газобетона представляют минеральные добавки техногенного и природного происхождения. Наибольший гидравлический потенциал содержит доменный гранулированный шлак (ДГШ) при его использовании в качестве компонента цементных материалов.

При проведении исследований нами был использован ДГШ производства ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Его основные характеристики представлены согласно информации, приведенной в сертификате качества производителя шлака (табл. 1). Исследования проводились в два этапа. После лабораторных исследований и корректировки технологических параметров составов производилась формовка газобетона в промышленных условиях согласно технологическому регламенту предприятия.

Таблица 1.

Основные характеристики ДГШ ПАО «АрселорМиттал»

| Влажность % | Химический состав |                                |      |      |      |                  | Содержание радионуклидов |
|-------------|-------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------|--------------------------|
|             | SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MnO  | MgO  | TiO <sub>2</sub> |                          |
|             | 38,74             | 7,18                           | 44,8 | 0,37 | 7,84 | 0,29             | 94                       |
| 5,6         | 38,13             | 7,34                           | 45,5 | 0,36 | 7,6  | 0,28             | 94                       |
| 9,1         | 38,2              | 7,32                           | 45,4 | 0,37 | 7,66 | 0,28             | 94                       |

Молотый ДГШ выполняет функцию вяжущего, а также, отчасти, кремнеземистого компонента.

Современные газобетонные заводы работают по безотходной технологии, и срезанный газобетонный сырец в виде шлама постоянно возвращается для повторного использования. Как известно, возвратный шлам в составе сырьевой смеси выполняет функцию кристаллической затравки, повышает седиментационную устойчивость смеси, обеспечивает однородность плотности и прочности газобетона по всей высоте формовки.

Все отформованные смеси имели одинаковые характеристики, выдерживались в камере набора пластической прочности и подвергались автоклавной обработке в промышленном автоклаве в соответствии с технологическим регламентом, принятом на предприятии. Результаты исследований [4] влияния замены части портландцемента ДГШ приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5 замена портландцемента ДГШ приводит к экономии цемента, незначительному увеличению прочности газобетона при сжатии. Замена 5-15% цемента ДГШ одновременно решает несколько важных практических задач, таких как экономия цемента, утилизация отходов, косвенное снижение выбросов парниковых газов.

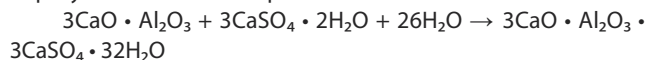
Использование ДГШ вместо части цемента, особенно при повышенной дозировке 15...20%, сказывается на кинетике прироста пластической прочности сырца до автоклавной обработки. В последствии, в условиях автоклавной обработки ДГШ активизируется щелочной составляющей вяжущего (известью, цементом, возвратным шламом) и сульфатной добавкой. Функцию сульфатной добавки выполняет гипсовый камень, который вводится в газобетонную смесь в количестве 3...5% при помоле песка.

Практика использования добавки гипса в цементе существует более 100 лет, он замедляет гидратацию не только цемента, но и, в большей мере, и извести. Проведенные стандартные исследования извести производства Любомирского силикатного завода показали ее активность (CaO + MgO) 80% и время гашения 6 минут, а наличие добавки гипсового камня приводит к существенному торможению процесса гидратации извести (рис.6).

Как видно из рис. 6, при дозировке гипса начиная с 1...2 % происходит существенное снижение температуры гидратации извести. При замедлении гидратации цемента и извести происходит выравнивание во времени процессов завершения газовой выделения и начала схватывания смеси, исключается подсаживание смеси, выхлопы водовода, недоспучивание смеси.

Благодаря высокой температуре газобетонного массива (более 78 °С) в процессе формования смеси часть воды испаряется из нее в процессе набора пластической прочности до перемещения на пост резки. Согласно [5] алюминатная составляющая, содержащаяся в цементе (C<sub>3</sub>A), в газообразователе (алюминиевой пудре), в ДГШ при наличии гипсовой добавки способствует образованию большого количества этtringита.

Как известно, при наличии гипсового камня процесс гидратации C<sub>3</sub>S замедляется и на поверхности зерен C<sub>3</sub>A образуется оболочка этtringита.



При концентрации гидроксида кальция в поровой жидкости материала ниже 0,5 г/л, этtringит кристаллизуется без существенного расширения, армирует и укрепляет макроструктуру сырца. Многими исследованиями доказано, что как только концентрация SO<sub>3</sub> в растворе уменьшается, этtringит

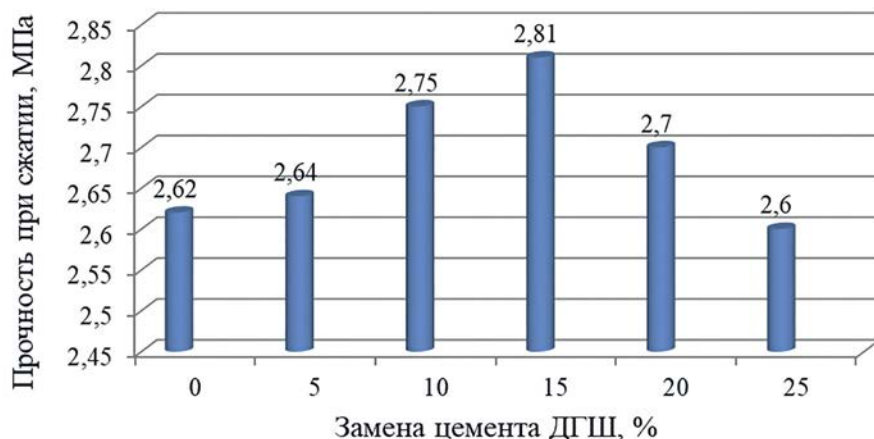


Рис. 5. Влияние замены портландцемента добавкой ДГШ и гипса на прочность автоклавного газобетона D300

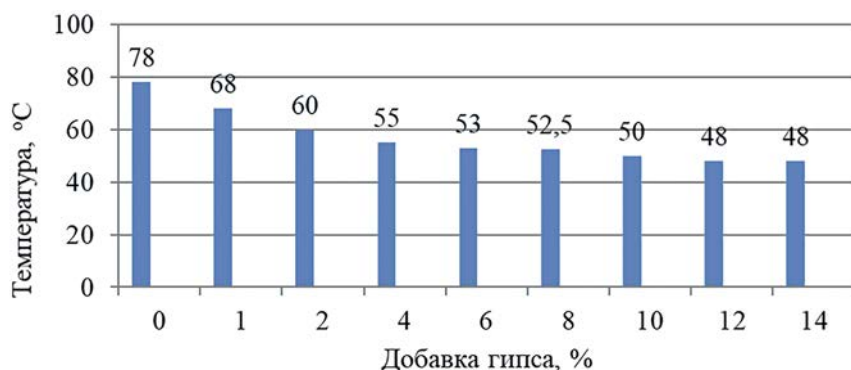
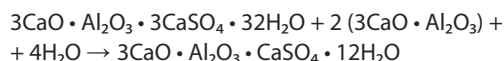


Рис. 6. Влияние добавки гипсового камня на температуру гидратации негашеной извести

становится нестабильным и превращается в моносульфат:



Многие исследователи сходятся на том, что эттрингит при повышенных температурах свыше 90 °C теряет воду и превращается в моносульфатную форму  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , а при автоклавной обработке разрушается до ангидрита и уплотняет структуру новообразований.

Кристаллы эттрингита в виде длинных тонких игл, под микроскопом напоминают некоторые бациллы, поэтому в технической литературе он известен как «цементная бацилла». Он связывает свободную влагу, обеспечивает схватывание и укрепление макроструктуры газобетонной смеси и условно «армирует» газобетонную смесь на стадии роста пластической прочности.

Если схватывание смеси запаздывает, то пузырьки водорода «пронизывают» массив (называют это «кипением» массива) – смесь недовспучивается и, наоборот, когда схватывание уже состоялось, а газовыделение не завершилось, то происходят выхлопы газа и разрушение структуры газобетона.

На современных заводах оптимальные технологические параметры газобетонной смеси поддерживаются в автоматическом режиме и контролируются системой датчиков и программным обеспечением.

Искусственно синтезированный эттрингит на стадии формования газобетонной смеси низкой плотности обеспечивает необходимый прирост пластической прочности. Замена части цемента добавкой ДГШ и гипса позволяет экономить расход минерального вяжущего и

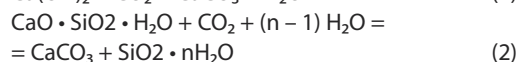
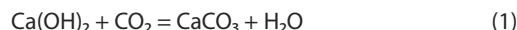
вписывается в литьевую технологию производства газобетона.

#### Атмосферостойкость газобетона низкой плотности

Автоклавный газобетон плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> и ниже следует рассматривать как относительно новый материал, который подвержен большему воздействию атмосферных факторов. Паропроницаемость газобетона по мере снижения его плотности D300; D150; D100 существенно увеличивается (рис. 7).

При повышении паропроницаемости газобетон может адсорбировать из атмосферы водяные пары, кислые газы, и, прежде всего, CO<sub>2</sub>.

При переходе на производство газобетона низкой плотности при наличии влаги увеличивается вероятность карбонизации газобетона. Углекислый газ вступает в реакцию с Ca(OH)<sub>2</sub> и продуктами гидратации минерального вяжущего, что приводит к нейтрализации щелочной среды с образованием карбоната кальция (1) и (2).



Продукты карбонизации CaCO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> характеризуются низкой растворимостью в воде, потому они выполняют функцию коагулирующей добавки, особенно в плотных бетонах. Количественное соотношение CaCO<sub>3</sub> к SiO<sub>2</sub> составляет примерно 5 к 1, поэтому основным коагулянтом в данных условиях выступает карбонат кальция. Авторы [6] в условиях углекислотной агрессии рекомендуют при производстве газобетона применять

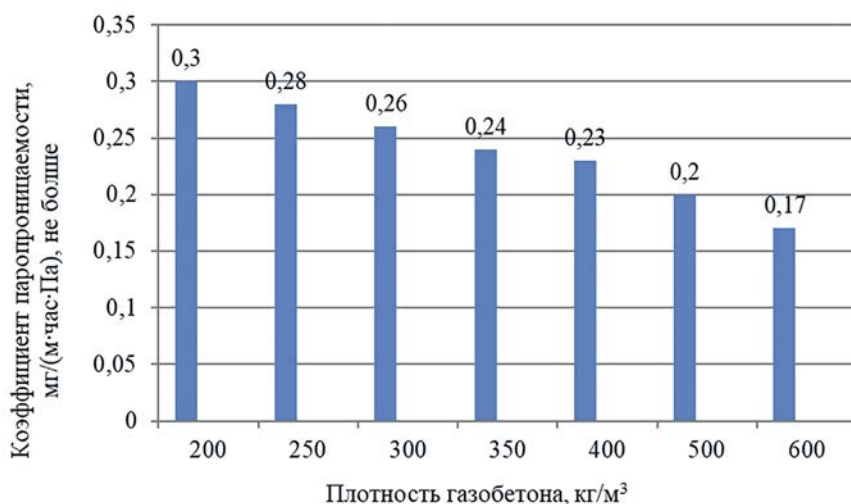


Рис. 7. Зависимость коэффициента паропроницаемости автоклавного газобетона от его плотности

высокоосновные цементы, так как при этом образуется максимальное количество  $\text{CaCO}_3$ , как кольматанта.

По данным [7] добавка известняка в цемент, аналогично добавке гипса, может регулировать и влиять на схватывание цемента и скорость реакций гидратации  $\text{C}_3\text{A}$  и  $\text{C}_3\text{S}$ . Установлено, что известняк не является инертным растворителем, а в процессе гидратации портландцемента реагирует с  $\text{C}_3\text{A}$  с образованием карбоалюминатов кальция. При этом имеет место образование, как высококарбонатной формы карбоалюмината  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , так и низкокарбонатной  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

Эти новообразования, в определенной степени, являются аналогами высокосульфатной формы (эттрингита) и моносульфатной формы сульфалюминатов кальция. Они выполняют важную роль на стадии формирования макроструктуры газобетонного сырца при высоком В/Т отношении смеси.

В работах [8-10] подтверждается повышение стойкости газобетона против углекислотной коррозии при использовании карбонатных добавок, высококальциевых зол, добавки доломита.

При проведении промышленных испытаний в качестве добавки полифункционального действия нами была выбрана добавка опоксидного мергеля (ОМ), содержащая  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые принимают участие в автоклавном синтезе новообразований [11].

Таким образом, при оптимизации сырьевой смеси с использованием добавки гипсового камня и ДГШ достигается экономия вяжущего, а карбонатная составляющая смеси повышает атмосферостойкость газобетона низкой плотности.

При этом важная роль отводится логистике сырьевых компонентов и дополнительных технологических переделов по их использованию в технологии существующего предприятия. Экономическая эффективность будет определена после завершения комплекса всех исследований.

### Выводы

В условиях необходимости увеличения объёмов строительства нового жилья при существующих тенденциях увеличения удельного веса строительства малоэтажного жилья возникает необходимость увеличения производства современных стеновых и теплоизоляционных материалов.

Повышение цен на энергоносители и нормативных требований к показателям термического сопротивления ограждающих конструкций привело к удалению со строительного

рынка энергозатратных на стадии производства и не энергоэффективных на стадии эксплуатации традиционных стеновых материалов (кирпича керамического и силикатного, керамзита и керамзитобетона). Нишу традиционных стеновых материалов занял автоклавный газобетон, его удельный вес в структуре стеновых материалов Украины составляет 53%.

Нормативные требования термического сопротивления ограждающих конструкций в Украине существенно ниже аналогичных показателей европейских стран с такими же климатическими условиями. Реализация строительства новых и реконструкции (термомодернизации) существующих зданий с соблюдением высоких стандартов энергоэффективности – зданий с приближенным к нулевому уровню потребления энергии (ППЭЗ) требует незамедлительного повышения нормативных требований термического сопротивления ограждающих конструкций. В этой связи, в новой редакции государственных строительных норм должны быть отражены повышенные показатели термического сопротивления ограждающих конструкций.

Реализация европейских стандартов энергосбережения в производстве стеновых строительных материалов в новом строительстве и в утеплении существующего жилищного фонда требует увеличения объёмов производства и применения энергоэффективного автоклавного газобетона до уровня европейских стран (200 м<sup>3</sup>/тыс. чел в год), или примерно в 2 раза выше уровня его производства в 2019 году.

Относительно большие резервы снижения энергетических затрат производства автоклавного газобетона придутся на совершенствование автоклавной обработки, переход производства автоклавного газобетона и использования ДГШ и гипса в качестве части минерального вяжущего.

Введение в состав газобетонной смеси карбонатной добавки обеспечивает повышение атмосферостойкости газобетона низкой плотности.

Компанией «АЭРОК» отработана технология производства автоклавного газобетона с широким диапазоном плотности. За счет оптимального соотношения компонентов смеси предусматривается искусственный синтез в относительно большом количестве эттрингита на стадии формирования газобетонной смеси, который обеспечивает необходимый рост пластической прочности сырца, при сокращенном расходе цемента.

### Литература:

1. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. – Київ, Мінрегіонбуд України. – 2017. – 37 с.
2. Кафтаева М.В., Рахимбаев И.Ш Тепловыделение при синтезе гидросиликатной связки автоклавного газобетона/ Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. №10, 2013-С.373-376.
3. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (СН 277-80). Госстрой СССР. М. Стройиздат. 1981. 46с.
4. Рудченко Д.Г., Дюжилова Н.О., Сердюк В.Р. Оцінка можливості застосування доменних гранульованих шлаків в технології виробництва автоклавного газобетону. Вісник ОДАБА. Випуск №79. 2020. –С.117-126.
5. Кудеярова Н.П., Ожерельева А.Ю. Влияние добавки гипса на качество композиционного вяжущего для изделий ячеистой структуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 6. С. 96–101.
6. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М., Кафтаева М.В. К вопросу о механизме углекислотной коррозии строительных материалов // Фундаментальные исследования. – 2015.– № 5-1. – С. 19-26.
7. Штарк Й., Бернд В. Цемент и известь / Пер. с нем. А. Тулаганова под ред. П. Кривенко. – К.: Оранта, 2008. – 480с.
8. Легостаева Н. В., Нестерова Т. Ю. Механические свойства газобетона с добавками шлама карбоната кальция. Вестник ТГАСУ № 1, 2017. –С.155-161.
9. Божок Е.В., Вольф А.В. Маноха А.М. Козлова В.К. Пути снижения усадочных деформаций при твердении и службе газобетона. Ползуновский весник. № 2. 2017. –С.105-109.
10. Воробьев А.А., Елфимов В.И. Влияние карбонатных добавок на долговечность ячеистых бетонов. Весник РУДН, сер. Инженерные исследования, 2001, №1,-С.86-89.
11. Рудченко Д. Г. Теоретические предпосылки использования комплексной активной минеральной добавки в технологии автоклавного газобетона. Збіник наукових праць. Науковий вісник будівництва, ХНУБА. 2020, т. 100, №2. – С.201-209.