



Брауэрс Х. Дж. Х., департамент архитектуры, строительства и планирования,
Технический университет Эйндховена, Нидерланды

РАЗРАБОТКА ЭКО-БЕТОНА

Brouwers, H. J. H., Department of Architecture, Building and Planning,
Eindhoven University of Technology, the Netherlands

DEVELOPMENT OF ECO-CONCRETE

Аннотация

Строительная промышленность — самый крупный потребитель материалов и энергии. В этой отрасли используется большое количество сырья и гигантское количество энергии для производства и перевозки сырья, строительных материалов и продуктов [1, 2]. Из всех строительных материалов бетон является самым сложным по химической и физической природе, а потому представляет особый интерес с научной точки зрения. При этом объем его производства в мире больше, чем объем всех других производимых материалов. В этой статье представлены методология и примеры более чистого в экологическом смысле бетона.

Ключевые слова: гранулометрический состав; минералогический состав; сырьевые материалы; цементная эффективность; трехмерная симуляционная 3D-модель; использование промышленных отходов; стабилизация отходов.

Введение

В **таблице 1** приведены годовые объемы мирового производства самых важных строительных материалов. Некоторые из них используются исключительно в строительном секторе, другие, например сталь и изделия из древесины, применяются также в других отраслях. Цифры показывают, что в глобальном масштабе именно производство строительных материалов и весь жизненный цикл материала или сооружения имеют не только первостепенное экономическое, но и экологическое значение, так как могут привести к загрязнению окружающей среды и истощению природных ресурсов. Под загрязнением подразумеваются выбросы в воду, воздух, почву и производство отходов, зловоний, шума и других факторов, представляющих угрозу для окружающей среды. За последние 40 лет современное общество в основном решило вопрос загрязнения. Сложной задачей, которая стоит перед нами сейчас, остается более эффективное использование природных и энергетических ресурсов.

Многие строительные материалы состоят из частиц неправильной формы различных размеров (являются полидисперсными), обычно расположенных хаотично, как, например, в бетоне. Частицы должны

Abstract

The building industry is the largest consumer of energy and materials. In addition to the huge amount of raw materials involved, enormous amounts of energy are used for production and transport of raw materials, building materials, and products [1, 2]. Among all building materials, concrete is chemically and physically the most complex and scientifically the most interesting, and its worldwide production is larger than that of all the other man-made materials combined. In this paper, methodologies and examples of environmentally friendlier concretes are presented.

Key words: particle size engineering; mineral oxide engineering; cement efficiency; 3-D simulation model; use of by-products; stabilization of waste.

Introduction

Table 1 shows the global production of the most important man-made materials in 2008. Some of these materials are used in the building sector exclusively; others such as steel and timber are used in other industries as well. The numbers illustrate that building materials are of the utmost economical and environmental importance globally and their production may involve contamination and depletion of finite resources. Contamination includes emissions into water, air, and soil, and production of waste, stench, noise, and other forms of nuisances. This takes place during production but also during the entire lifecycle of a material and an object. In contemporary societies, the aspect of contamination has largely been solved in the past 40 years. The challenge that we are now facing is more efficient use of resources.

Many building materials contain irregularly shaped particles of various sizes (polydisperse), in most cases randomly packed, as is the case in concrete. The particles need to be combined in a specific way for the building material to have the desired properties. In other words, there is a need for recipes according to which the raw materials would be combined and processed into the desired materials or products. These products not only have to fulfill a broad range of technical demands but must also meet requirements with respect to maintenance, repair, recycling, sensory qualities, etc. The raw materials and ingredients need to be available in sufficient quantities of constant quality, and the product

Таблица 1. Мировое производство материалов, млн т (2008 г.)

Table 1. Global production of materials, mln t (2008)

Изделия из древесины // Timber	4000	Негашеная известь // Quicklime	130
Пластмасса и резина // Plastics and rubber	250	Стекло // Glass	120
Сталь // Steel	1400	Цемент // Cement	2500
Гипс // Gypsum	250	Бетон // Concrete	15 000

быть скомбинированы таким образом, чтобы получить необходимые показатели строительного материала. Другими словами, требуются методики, согласно которым проектируется состав из неоднородного сырья и производятся материалы и продукты. Получаемые продукты должны не только соответствовать заданным техническим параметрам, но также отвечать требованиям по обслуживанию, ремонту, переработке, органолептическим свойствам материала и т. д. Сырье и компоненты должны быть доступны в больших количествах при постоянном качестве, а продукт — легко перерабатываться на строительном объекте. Наиболее идеально соответствует данным требованиям такой пористый материал, как бетон.

Бетон — уникальный по своим качествам материал, и не только из-за гигантских объемов производства. Обычный бетон состоит из цемента, заполнителей и воды и содержит частицы размером от 300 нм до 32 мм, в массивных конструкциях (например, дамбах) — до 64 или 128 мм. Нет другого созданного человеком материала, в котором размеры составляющих его частиц отличались бы друг от друга на пять порядков. В начальной фазе формирования бетон имеет необходимую подвижность, что дает широкую свободу для инженерных решений, в то время как в затвердевшем состоянии он обладает высокой прочностью, почти не требует обслуживания и предоставляет большие возможности для архитектурных решений.

Цемент — самый энергоемкий и поэтому дорогостоящий компонент бетона. Он также производится в больших количествах (табл. 1). Производство цементного клинкера во вращающейся печи является очень энергоемким процессом. В последние десятилетия эффективность этих печей увеличилась. Самые современные печи производят около 10 000 т клинкера в сут.

Показатели по энергопотреблению улучшаются год от года. Происходит это благодаря замене традиционных видов топлива более дешевыми отходами, например измельченными автомобильными покрышками, костяной мукой, осадком сточных вод, бумажными отходами и т. д. При использовании альтернативных источников топлива температура спекания может быть ниже 1450 °C, что также способствует энергосбережению [3].

should be manageable at the building site. A porous material that often fulfills these requirements is concrete.

Concrete is a spectacular material, and not just because of its enormous production volume. Conventional concrete consists of cement, aggregates, and water and comprises grains with size ranging from 300 nm to 32 mm, and in massive structures (e.g. dams), even to 64 or 128 mm. There is no other man-made material with such a broad (five decades) range of particle sizes. In the fresh state, it is fluid and enables a high degree of design freedom, while in the hardened state concrete is durable and almost maintenance-free and has a great architectural potential.

Cement is the most energy-intensive and expensive ingredient of concrete, and it is also produced in very big quantities (Table 1). The manufacture of cement clinker in a rotary kiln is an energy-intensive process. In the recent decades, the efficiency of such kilns has increased. The most advanced kilns produce 10,000 tons of clinker per day.

Energy efficiency is improved by replacing conventional fossil fuel with waste as a low-cost secondary fuel, e.g. ground car tires, bone meal, sewage sludge, paper sludge, etc. When using alternative fuels, sintering temperatures can be lower than 1450 °C, which is also beneficial for energy saving [3].

Savings and optimization are also possible on the materials' side. By-products from other industries can be used as a substitute for cement producing kiln. Blast furnace slag is a by-product from the steel industry and a common substitute for clinker. The use of so-called slag cement results in very durable concrete and comprises about a half of the Dutch cement market [4]. Powder coal fly ashes have a very similar composition to clay, and class F fly ash is similar to OPC. These fly ashes are produced in big quantities (Table 2).

Fly ash can also substitute clinker, and a substitution rate of 30 % is already common. A recent study presented a substitution level of 50 % [5]. Both slag and fly ash contain non-crystalline (amorphous) mineral oxides which, in contrast to their crystalline counterparts, are reactive.

The building industry and the concrete industry in particular are also interested in further reduction of cement

Таблица 2. Мировое производство побочных продуктов, млн т (2008 г.)

Table 2. Global production of by-products, mln t (2008)

Зола тепловых электростанций // Coal ashes	1000	Доменный гранулированный шлак // Blast furnace slag	120
Сталелитейный шлак // Steel slag	140	Гипс, получаемый в процессе десульфирования дымовых газов // Flue gas desulfurization gypsum	50

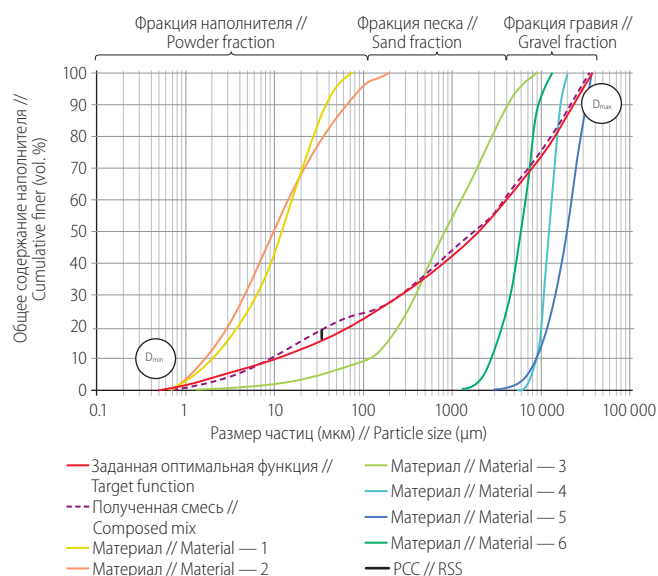


Рис. 1. Интегральное распределение частиц по фракциям (РЧФ) всех компонентов смеси (измеренное лазерной гранулометрией и ситовым анализом), и РЧФ смеси (пунктирная линия), составленные с помощью подбора гранулометрического состава смеси. Кроме того, показана заданная функция (сплошная линия) [8]

Fig. 1. The cumulative particle size distributive (PSD) of all ingredients in a mix (measured with a laser granulometry and sieves), and the PSD of the mix (dashed line) composed with the help of the mix design tool. The target function (solid line) is also shown [8]

Экономия и оптимизация также возможны с точки зрения материалов. Отходы других производств подходят для использования в качестве заменителей сырья при производстве цемента. Доменный гранулированный шлак одновременно является побочным продуктом металлургической промышленности и пространственной минеральной добавкой. Применение так называемого шлакоцемента позволяет получить очень прочный бетон, а шлакобетон занимает примерно половину рынка Нидерландов [4]. Зола-унос пылевидного топлива имеет химический состав, очень похожий на глину, а зола-унос класса F имеет сходство с обычным портландцементом. При этом зола-унос может производиться в очень больших количествах (табл. 2).

Зола-унос также может использоваться в качестве добавки для замещения клинкера в составе цемента; зольные цементы с уровнем замещения в 30 % уже получили широкое распространение. Недавние исследования показали возможность замещения клинкера до 50 % [5]. При этом шлак и зола-унос содержат стекловидные (аморфные) природные оксиды, которые вступают в реакции активнее, чем их кристаллические аналоги.

Строительная и цементная промышленности заинтересованы в сокращении применения клинкера и даже самого цемента, например путем введения инертной минеральной или активной добавки (т. е. микронаполнителя) в бетонную смесь. Один из критериев эффективности, который получает все большее значение, — это экологичность используемого материала. Для бетона эта тенденция означает продуманное использование цемента, который является самым дорогим и энергоемким компонентом бетона. Вторая, не менее важная

clinker and even cement consumption, e.g. by adding inert powders (i.e. fine aggregate) and reactive powders to the concrete mix. One of the performance criteria that is gaining importance is the environmental footprint of the building material used. For concrete, these developments imply smart use of cement, which is the most energy- and cost-intensive component of concrete. A second, equally important motivation is cost reduction, as cement is the most expensive component in a concrete mix. For a sound concrete recipe, all the ingredients need to fit both physically and chemically: this is achieved by “particle size engineering” and “mineral oxide engineering”.

Particle size engineering

Particles of various sizes are combined to produce the concrete mix. The combination of all individual particle distributions results in an overall particle size distribution of the mix. This overall grading of the mix, containing particles from 300 nm to 32 mm, determines the mix properties in the fresh state, namely, the flow properties and workability. However, the properties of hardened concrete, such as strength and durability, are also determined by the overall particle size distribution. A mix design tool has been developed based on the insight that superior properties of a granular mix are achieved when a so-called geometric particle size distribution is obtained considering all solids in the mix (i.e. not aggregates only), an idea that had already been put forward in 1950 [6]. Geometric particle arrangements had been proposed much earlier by [7] in their study of aggregate packing more than 100 years ago.

Using linear optimization, a fit of a granular blend containing all the solids used is made according to a defined distribution function [8–10]. Fig. 1 shows the cumulative particle size distribution or particle size distribution (PSD) of a number of ingredients (micro-powder, cement, sand, gravel, etc.), which are combined in a way that their mix best approaches the geometric packing represented by the “target function”. The logarithmic scale on x-axis in Fig. 1 illustrates again the enormous particle size range in this typical concrete mix, namely, five decades.

The concretes designed with the presented approach show excellent properties in both fresh and hardened states. Self-Compacting Concretes (SCC) have been designed and produced with a D_{max} of 32 mm, with recycled aggregates, with photocatalytic TiO_2 , with dimension stone “waste”, etc. Concretes with a specific density of 1100 kg/m³, a thermal conductivity of 0.27 W/mK and a 28-day compressive strength of 37 N/mm² have also been developed using lightweight aggregates [8, 10].

There is a spin-off project in the province of Overijssel, the municipality of Hengelo and Struyk Verwo Groep, where a street has been paved with 1000 m² TiO_2 -containing photocatalytic concrete, a patented technique [11]. This street is currently being monitored, and so far an NO_x reduction of 25–45 % has been observed (three separate measurements during spring 2010).

составляющая, — это сокращение расходов используемых материалов, так как цемент является самым дорогостоящим компонентом бетонной смеси. Для получения оптимальной рецептуры все компоненты должны быть совместимыми в физическом и химическом отношении: это достигается подбором гранулометрического и минералогического состава сырьевых материалов.

Подбор гранулометрического состава

В процессе формирования бетонной смеси участвуют частицы различных размеров. Интегральное распределение частиц по фракциям в смеси представляет собой сумму распределений частиц каждого из ее компонентов. Интегральный гранулометрический состав смеси, содержащей частицы от 300 нм до 32 мм, определяет качество растворной смеси: растекаемость и удобоукладываемость, а также показатели бетона, такие как прочность и долговечность. Была разработана технология подбора гранулометрического состава, основывающаяся на понимании того, что наилучших показателей полифракционная смесь достигает, когда получается оптимальное распределение по геометрическим размерам частиц всех твердых составляющих смеси (т. е. не только наполнителей). Идея сформировалась еще в 1950 г. [6], а сама теория геометрической упаковки частиц выдвигалась и того раньше — более 100 лет назад, при исследовании упаковки наполнителей [7].

С помощью метода линейного программирования осуществляется подбор состава многокомпонентной смеси путем определения необходимого содержания каждого из используемых компонентов по заданной оптимальной функции распределения. На **рис. 1** показано интегральное распределение частиц по фракциям (РЧФ) и РЧФ нескольких компонентов (микронаполнитель, цемент, песок, гравий и т. д.), которые составлены таким образом, что их смесь в наибольшей степени близка геометрическому распределению, представленному оптимальной функцией. Логарифмический характер шкалы по оси ОХ на **рис. 1** еще раз иллюстрирует гигантский разброс размеров

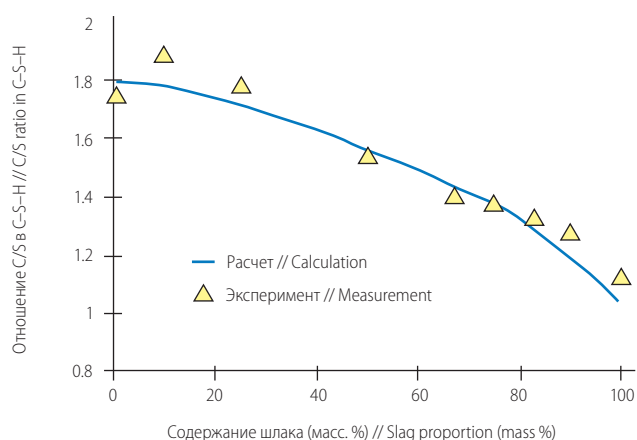


Рис. 2. Расчетное и экспериментальное отношение C/S в C-S-H в зависимости от содержания шлака в смешанном цементе [4]. C-S-H — самый распространенный продукт гидратации

Fig. 2. Calculated and measured C/S ratio in C-S-H versus slag proportions in blended cement [4]. C-S-H is the most abundant hydration product

Compressive Conventional Vibrated Concrete (CVC) and SCC strengths of 30 to 60 N/mm² have been achieved with a total binder (cement clinker and cementitious by-products) content of 200–270 kg/m³ [8]. Earth-moist concrete with a compressive strength of 100 N/mm² has been produced with 325 kg/m³ OPC as the binder. More importantly, it was seen that the flexural strength hardly decreased when the OPC content was reduced to 175 kg/m³ [10]. Much better workability and higher strength were obtained as compared to concretes with the same cement contents. In this regard, a property entitled “cement efficiency” was introduced, which is defined as compressive strength (N/mm²) per unit of cement content in a concrete mix (kg/m³). Equivalently, it has become possible to design equally performing concretes with less superplasticizer (and without viscosity modifying admixtures) and high cement efficiencies.

For the design of concrete, traditional methods and prescriptions concern, e.g. the cement content, the total content of particles smaller than 250 μm, and the water-cement ratio. The developed design method allows for a more performance-based mix design. Many existing mixes have been optimized with regard to efficient cement and admixture use. In many cases, this has resulted in the incorporation of such ingredients, as inert powders (fine aggregate) and cementitious by-products. For use waste as a binder in mortar, insight into the hardening reactions of cement clinker, cementitious by-products, and contaminants (if any) is required, which is the rationale for mineral oxide engineering.

Mineral oxide engineering

At first, the hydration of the mineral oxides appearing in OPC, the most abundant binder, was studied. Based on the water retention data [12], the hydration reactions of the four major clinker phases (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF) and their hydration products, such as C-S-H and CH, etc., were quantified [13, 14]. Next, reaction models for alkali-activated slag and slag-blended cement were established based on stoichiometric calculations [4]. The models correlate the mineral compositions of slag and Portland cement clinker and their blending proportions with the quantities and compositions of the hydration products formed including their rate (reaction speed) of formation.

In blast furnace slags, the typical C/S ratios are close to one, and part of the CH produced by the hydration of C₃S and C₂S in the clinker is available to increase the C/S ratio of C-S-H formed from the slag. It was proposed that the fraction of consumed CH is proportional to the difference in C/S ratio of the slag and the C/S ratio of C-S-H produced by the clinker, namely, 1.7, a concept that is compatible with reality (Fig. 2) [4].

For numerical simulation of the hydration reactions and the pore water composition, in the author's group a 3-D simulation model (CEMHYD3D) from NIST [15] was adopted and extended [4, 16]. The application of rules that are similar to cellular-automata on the matrix of voxels simulates the hydration (Fig. 3).

частиц, достигающий в этой стандартной бетонной смеси пяти порядков.

Бетоны, подобранные по представленной выше методике, имеют отличные показатели как на начальной стадии, так и в период формирования структуры. Разработаны и изготовлены самоуплотняющиеся бетонные смеси: с максимальным размером частиц — 32 мм; с заполнителями из промышленных отходов; с фотокаталитическим TiO_2 ; с отходами обработки природного камня и т. д. Кроме того, с применением легких заполнителей были разработаны бетоны со средней плотностью 1100 кг/м^3 , теплопроводностью $0,27 \text{ Вт/м}$ и прочностью при сжатии в возрасте 28 сут., равной 37 Н/мм^2 [8, 10].

В качестве экспериментального проекта при поддержке компании «Struyk Verwo Groep» по запатентованной технологии в голландском городе Хенгело (пров. Оверэйсел) 1000 м^2 одной из улиц были покрыты фотокаталитическим бетоном, содержащим TiO_2 [11]. Сейчас эту улицу изучают с применением методов вычислительной гидродинамики. На данный момент зарегистрировано сокращение выбросов NO_x на 25–45 % (по данным трех независимых измерений, проведенных весной 2010 г.).

Прочности при сжатии самоуплотняющегося и вибрированного бетона от 30 до 60 Н/мм^2 были достигнуты при расходе вяжущего (цементного клинкера или вяжущих веществ), равном $200\text{--}270 \text{ кг/м}^3$ [8]. Бетонная смесь землисто-влажной консистенции с прочностью при сжатии, равной 100 Н/мм^2 , производится с применением в качестве вяжущего вещества обычного портландцемента при расходе 325 кг/м^3 . Более важно, что прочность при изгибе почти не меняется при снижении расхода портландцемента до 175 кг/м^3 [10]. В итоге по сравнению с другими бетонами при одинаковом содержании цемента была достигнута гораздо более высокая прочность и улучшены другие показатели. В связи с этим был введен термин «цементная эффективность», определяемый как прочность при сжатии (Н/мм^2) на единицу содержания цемента в бетонной смеси (кг/м^3). Точно так же стала возможной разработка бетонов, которые при меньшем расходе суперпластификатора (и без добавок, регулирующих вязкость) сохраняют рабочие показатели и имеют более высокую «цементную эффективность».

При проектировании бетонной смеси традиционные методики и рекомендации в качестве основных характеристик используют, например, удельную долю цемента в смеси, общее содержание частиц размером менее 250 мкм или водоцементное отношение (B/C). Новый разработанный метод позволяет создавать составы, более ориентированные на качественные, а не количественные показатели. Многие уже существующие смеси были оптимизированы с точки зрения эффективного использования цемента и добавок. В большинстве случаев необходимый результат может достигаться при применении таких компонентов, как инертные минеральные добавки (микронаполнители) и вяжущие из отходов промышленного производства.

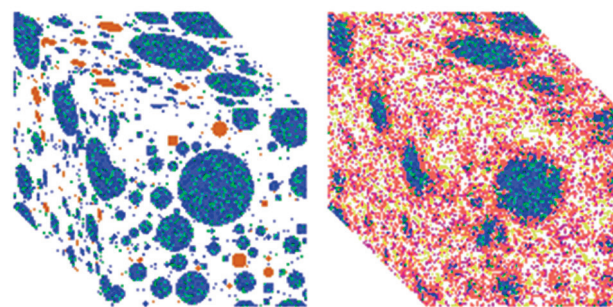


Рис. 3. Моделирование микроstructures обычного портландцемента при помощи технологии CEMHYD3D в ячейке объемом 100 мкм : начальная система обычный портландцемент/вода (слева); частично гидратированная система (справа) [16]

Fig. 3. Development of OPC microstructure by CEMHYD3D in a $100 \text{ }\mu\text{m}$ box: the initial OPC/water system (left); the partly hydrated system (right) [16]

The pore water composition (e.g. pH) was modeled, and the reactions of fly ash and slag were incorporated [4, 16]. In the original model, the system resolution had a considerable effect on the simulation results. The simulations performed with different system resolutions (from 0.5 to $2 \text{ }\mu\text{m}$) demonstrated the robustness of the improved model [4]. Currently, CEMHYD3D has been extended with several additional possibilities, which enable the hydration of particles as small as $0.2 \text{ }\mu\text{m}$, designated as a “multi-scale” feature [17].

Furthermore, several secondary binders have been designed and tested on members of the sponsor group. Guided by clauses 5.2 and 5.3 of the EN 206–1 standard, these companies dose cementitious by-products into the mix themselves and follow the relevant attestation route. This development has increased the utilization of cementitious by-products from different sources, i.e. not just the traditional blast furnace slag and powder coal fly ash. For their application as a binder in concrete, three technical criteria are important as well as price (sometimes negative if it relates to “waste”), constant composition, and availability in sufficiently large quantities:

- The workability, hardening, and related strength development;
- The durability of the product;
- The presence of contaminants.

A first indication of the suitability of a material as a cement substitute is obtained by preparing standard mortars and studying the fresh workability and the subsequent strength development during 28 days. For this purpose, CEMHYD3D is also used. For these cementitious by-products, it can also be opportune to blend them in order to obtain a composition of particle sizes and mineral oxides with optimum reactive characteristics.

Durability, for instance, can be assessed by measuring the water absorption, water intrusion, and freeze-thaw resistance and by rapid chloride migration (RCM) test [18]. The apparent diffusion coefficient determined by

Для этого требуются знания о процессах твердения клинкера и вяжущих на основе отходов промышленного производства, а также о влиянии на эти процессы вредных примесей (если таковые имеются), что является необходимым условием для правильного подбора минералогического состава сырьевых материалов.

Подбор минералогического состава

Сначала был изучен процесс гидратации основных минералов обычного портландцемента, самого распространенного вяжущего вещества. Основываясь на данных об объемах связанной и несвязанной воды [12], были количественно рассчитаны реакции гидратации четырех главных фаз клинкера (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) и продуктов их гидратации, таких как $C-S-H$ и CH и т. д. [13, 14]. Затем с помощью стехиометрических измерений были установлены параметры реакций для щелочеактивированных шлака и шлакоцемента [4]. Полученные данные позволяют согласовать минералогические составы шлака и портландцементного клинкера, а также их требуемое содержание, с количеством и составом продуктов гидратации с учетом скорости образования (реакции).

Доменный гранулированный шлак обычно обладает отношением C/S , равным единице, и часть CH , выделяемого при гидратации минералов клинкера C_3S и C_2S , может увеличивать отношение C/S в $C-S-H$, образующихся при гидратации шлака. При расчетах предполагалось, что доля прореагировавшего CH пропорциональна разнице в отношении C/S шлака и отношения C/S в $C-S-H$, образованных из клинкера, а именно 1,7, что вполне соответствует данным, полученным экспериментально (рис 2) [4].

Для количественного моделирования реакций гидратации и содержания воды в порах группой разработчиков из NIST (Национальный институт стандартов и технологий) была использована и расширена трехмерная симуляционная 3D-модель гидратации цемента (CEMHYD3D) [4, 15, 16]. Смоделировать процесс гидратации позволяет применение алгоритма, схожего

this method follows from assuming Cl^- concentration profiles in the specimen as shown in Fig. 4 (left).

A typical example of a true measured profile can be seen in Fig. 4 (right). A new diffusion model, which is based on non-linear (Freundlich) Cl^- absorption by the concrete and non-equilibrium with the pore water, yielded excellent agreement. This new model yields a more realistic diffusion coefficient together and mass transfer coefficient.

In addition to strength and durability, the purity and maximum level of contamination, both in composition and in leaching, are also relevant. E.g., in the Netherlands, the Soil Quality Decree sets limits for the composition and leaching of granular materials designated as “non-shaped” with respect to chloride, mercury, molybdenum, and strontium. If these requirements are not met, the granular material is considered as “waste”, and landfill of these materials is a remaining option. Composition and leaching are also leading in selecting the applicable landfill type and the relevant safety measures as laid down in the Landfill Decree.

By stabilization, e.g., combining different materials and adding primary binders (quicklime, hemi-hydrate, cement), a granular (“non-shaped”) or a shaped product can be fitted to a non-hazardous landfill, and sometimes it is even possible that the treated material will meet the Soil Quality Decree requirements to a building material.

Contaminated soil and dredged soil material are interesting “waste” that can be combined with primary binders and cementitious by-products (whether or not contaminated). After treatment of these “waste”, cheaper landfill or even use as a building material becomes possible. This saves the production of primary building materials as well as space and costs associated with landfill.

A few stabilization projects have been carried out, in which contaminated soil and dredged soils have been made into acceptable building materials [17, 20]. Non-shaped stabilized wastes can be used as road base material, traffic noise barriers, etc. Shaped stabilized wastes may be used as plain (unreinforced) concrete products such as slabs and blocks.

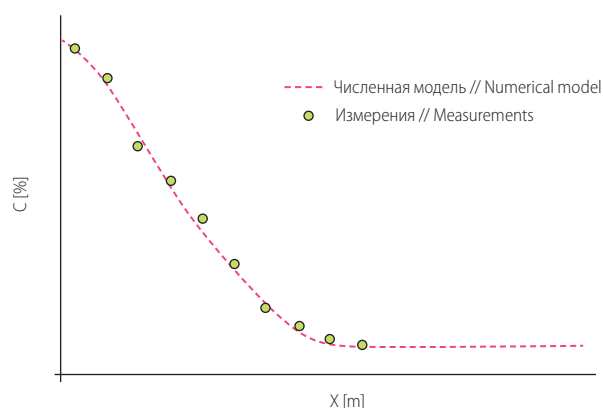
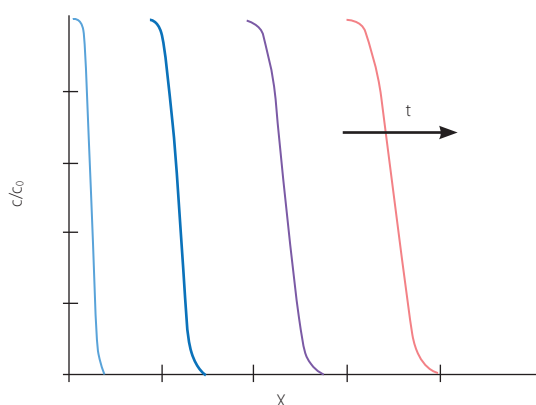


Рис. 4. Профили переноса хлоридов в бетоне во время теста RCM: спрогнозированный профиль (слева), измеренный профиль и прогноз 3D-модели (справа) [19]

Fig. 4. Chloride profiles in a concrete during RCM test: the assumed profile (left), a measured profile and the 3D-model prediction (right) [19]

с моделью клеточного автомата для матрицы объемного элемента изображения (рис. 3).

Был смоделирован состав водного раствора в порах (в частности, ее pH) при протекании реакций с участием золы-уноса и шлака [4, 16]. В исходной модели значительный эффект на результаты работы имела разрешающая способность системы. Моделирование, проведенное с разной разрешающей способностью (от 0,5 до 2 мкм), доказало надежность усовершенствованной модели [4]. На данный момент технология CEMHYD3D дополнена несколькими новыми возможностями, которые представляют собой шкалу с несколькими значениями цены деления и позволяют моделировать гидратацию частиц размером до 0,2 мкм [17].

Затем были разработаны несколько вяжущих материалов на основе промышленных отходов, которые протестировали на смесях, предоставленных компаниями-спонсорами. Опираясь на разделы 5.2 и 5.3 стандарта EN 206–1, компании-производители сами дозируют добавки побочных вяжущих продуктов, используя подходящую программу оценки. Эти исследования позволили увеличить применение вяжущих из побочных продуктов промышленности различного происхождения, помимо традиционных — доменного гранулированного шлака и золы-уноса тепловых электростанций. Для использования побочных продуктов в качестве вяжущего вещества в бетоне, помимо цены (которая, если продукт относится к отходам, стремится к нулю), постоянного состава и доступности в достаточных количествах, важны три технических критерия:

- ▷ удобоукладываемость, скорость схватывания и связанные с этим колебания прочности;
- ▷ срок службы продукта;
- ▷ наличие примесей.

Первый сигнал, указывающий на то, что материал способен выступать в качестве заменителя цемента, может быть получен уже при затворении смеси. Для этого (также с использованием CEMHYD3D) изучают его удобоукладываемость в виде бетонной смеси с последующим определением прочности состава в возрасте 28 сут. В случае вяжущих из побочных продуктов производства, для получения оптимальных характеристик реакционноспособности смеси применимы описанные выше методики подбора гранулометрического и минералогического состава сырьевых материалов.

Долговечность полученного материала можно оценить, например, по показателям водопоглощения, водопроницаемости, морозостойкости или методом быстрого переноса хлоридов (RCM) [18]. Кажущийся коэффициент диффузии, определенный этим методом, основывается на предполагаемых профилях распределения концентрации Cl^- в образце, как это показано на рис. 4 (слева).

Типичный пример правильно измеренного профиля представлен на рис. 4 (справа). Новая модель диффузии, основанная на нелинейной (по Фрейндлиху) адсорбции ионов Cl^- бетоном и учитывающая неравновесность воды в порах, дала идеальное совпадение.

Hydration models are also used to relate (Freundlich) binding and transport of anions (chloride) and cations (heavy metals) and microstructure. This is related to the binder recipe and hardening conditions [21]. Fixation of heavy metals is important for the stabilization of waste, binding of chloride for stabilization, and the durability of concrete structures.

Conclusions

Changing environmental regulations and technical standards give way to performance-based rather than regulation-based recipes of cement-based construction materials, driving product innovation. The scientifically and technically driven design and production methodology will continue to produce more sustainable, durable, and functional concrete. There are still plenty of practical problems to be solved, scientific questions to be answered, new raw materials that enter the market, and conceivable product innovations. Already now the present approach is used to develop architectural building products/components, such as cladding materials.

The air-purifying and self-cleaning concrete that is referred to herein is already of interest to architects. This type of concrete has been applied in the Dives in Misericordia church in Rome (architect Richard Meier) (Fig. 5), and the George Harrison Memorial Garden in London. Meanwhile, the abovementioned lightweight SCC is suitable for monolithic concrete buildings.

Acknowledgements

The author wishes to acknowledge the contribution of his coworkers: Ronald van Eijk, Wei Chen, Martin Hunger, Götz Hüskens, Ariën de Korte, Qingliang Yu, Milagros Ballari, Przemek Spiesz, Miruna Marinescu, Alberto Lázaro and George Quercia. His research is among others funded by the European Commission, STW, Dr. Ir. Cornelis Lely Foundation, M2i, Agentschap NL and the province of Overijssel, and by a sponsor group consisting of public and private organizations, its members support the chair in kind (materials, equipment, know-how and data) and with a contribution in cash. ◀

Литература // References

1. Graham, P. *Building ecology*. Blackwell, Oxford, U.K., 2003.
2. Berge, B. *The ecology of building materials (2nd Ed.)*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 2009.
3. Engelsen, C.J. *Effect of mineralizers in cement production*. Sintef Report SBF BK A07021, Trondheim, Norway, 2007.
4. Chen, W. *Hydration of slag cement, theory, modelling and application*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2007.
5. Baert, G. *Physico-chemical interactions in Portland cement — (high volume) fly ash binders*. PhD Thesis, University of Ghent, Ghent, Belgium, 2009.

Эта модель обеспечивает более точные данные для коэффициента диффузии и коэффициента массообмена.

Помимо характеристик прочности и долговечности, не менее важны соответствие применяемых отходов экологическим нормативам и обеспечение содержания вредных примесей ниже максимально допустимого уровня при взаимодействии с окружающей средой. Например, в Нидерландах Закон об охране почв устанавливает ограничения по способности сыпучих материалов, называемых также «бесформенными», к взаимодействию различного рода из-за опасности попадания в окружающую среду хлоридов, ртути, молибдена и стронция. Если сыпучий материал не отвечает требованиям закона, он считается отходом и его можно утилизировать. Устойчивость к взаимодействию с окружающей средой также оказывается самым важным параметром при выборе типа захоронения и соответствующих мер безопасности, предусмотренных Законом о захоронении отходов.

С применением метода стабилизации, например, комбинируя различные материалы с добавкой основного вяжущего вещества (гашеная известь, хемигидрат, цемент), сыпучий («бесформенный») или формованный продукт можно подогнать под требования безопасного захоронения, иногда даже возможно, что стабилизированный материал сможет удовлетворять требованиям к строительным материалам Закона об охране почв.

Загрязненные почвы и грунт землеустроительных работ также являются интересным видом «мусора», который можно комбинировать с основными вяжущими веществами и вяжущими из промышленных отходов (загрязненными или незагрязненными). После обработки этих отходов операция по захоронению становится более дешевой, а в идеальном случае они даже могут использоваться в качестве строительного материала. Это позволяет экономить основные строительные материалы, а также сокращать площадь территорий и затраты при захоронении отходов.

На данный момент выполнено несколько экспериментальных проектов по стабилизации, в которых загрязненная почва и грунт землеустроительных работ были преобразованы в строительные материалы требуемого нормативами качества [17, 20]. Сыпучие стабилизированные отходы могут применяться в качестве основы для материалов дорожных покрытий, ограждений от шума транспорта и т. д. Формованные стабилизированные отходы могут использоваться аналогично с изделиями из обычного (неармированного) бетона, например, в качестве плит и блоков.

Для построения зависимости (по Фрейндлиху) процесса связывания и переноса анионов (хлоридов) и катионов (тяжелых металлов) с микроструктурой отходов также обычно используются модели гидратации. Это позволяет подбирать состав смеси вяжущих веществ и условий твердения бетона [21]. Фиксация тяжелых металлов важна для стабилизации отходов, связывание хлоридов — для устойчивости и увеличения срока службы железобетонных конструкций.



Рис. 5. Церковь «Щедрый в милосердии» в Риме

Fig. 5. Dives in Misericordia church in Rome

6. Plum, N.M. *The predetermination of water requirement and optimum grading of concrete under various conditions*. Building Research Studies No. 3 / Statens Byggeforskningsinstitut Studie Nr. 3, The Danish National Institute of Building Research, Copenhagen, Denmark, 1950.
7. Fuller, W.B., Thompson, S.E. *The laws of proportioning concrete*. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 33, 1907. P. 222–298.
8. Hunger, M. *Integral design of ecological self-compacting concrete*. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2010.
9. Hüsken, G., Brouwers, H.J.H. *Earth-moist concrete: application of a new mix design concept*. Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008. P. 1246–1259.
10. Hüsken, G. *A multifunctional design approach for sustainable concrete, with application to concrete mass products*. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2010.
11. Murata, Y., Obata, H., Tawara, H., Murata, K. *NO_x-cleaning paving block*. US Patent 5861205, 1999.
12. Powers, T.C., Brownnyard, T.L. *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*. Bull. 22, Res. Lab. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., 1948, reprinted from J. Am. Concrete Inst. (Proc.), Vol. 43 (1947). P. 101–132, 249–336, 469–505, 549–602, 669–712, 845–880, 933–992.
13. Brouwers, H.J.H. *The work of Powers and Brownnyard revisited: Part 1*. Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004. P. 1697–1716.

Выводы

Изменение экологических и технических стандартов открывает дорогу материалам, главной характеристикой которых является качество, а не соответствие строительным нормативам, и тем самым способствует инновациям. Методология разработки и производства, основанная на научных и технических достижениях, позволяет добиваться изготовления все более прочного, долговечного и функционального бетона. Еще нужно решить много практических проблем, ответить на множество научных вопросов, и на рынке появляется все больше новых идей и инновационных продуктов. Уже сейчас такой подход используется для создания архитектурно-строительных продуктов, например таких, как облицовочные материалы.

Самоочищающийся и обеззараживающий воздух бетон, о котором упоминалось в статье, уже заинтересовал архитекторов. Этот тип бетона использовался при строительстве церкви Dives in Misericordia («Щедрый в милосердии») в Риме (арх. Ричард Мейер) (рис. 5) и при благоустройстве сада-мемориала Джорджа Харрисона (George Harrison Memorial Garden) в Лондоне. А легкий самоуплотняющийся бетон хорошо зарекомендовал себя при строительстве монолитных бетонных зданий. ◀

14. Brouwers, H.J.H. *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 2*. Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005. P. 1922–1936.
15. Bentz, D.P. *Three-Dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development*. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 80, 1997. P. 3–21.
16. van Eijk, R.J. *Hydration of cement mixtures containing contaminants, design and application of the solidified products*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2001.
17. de Korte, A.C.J. *Hydration and thermal decomposition of cement/calcium-sulphate based materials*. PhD Thesis, 2011.
18. Tang, L. *Chloride transport in concrete — measurement and prediction*. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1997.
19. Spiesz, P.R., Ballari, M.M., Brouwers, H.J.H. *A new chloride transport model for the non-steady-state chloride migration test (in progress)*.
20. Brouwers, H.J.H., Augustijn, D.C.M., Krikke, B., Honders, A. *Use of cement and lime to accelerate ripening and immobilize contaminated dredging sludge*. Journal of Hazardous Materials, Vol. 145, 2007. P. 8–16.
21. Florea, M.V.A., Brouwers, H.J.H. *Chloride binding by hydrated Ordinary Portland Cement*. Cement and Concrete Research, Vol. 42. P. 282–290.

15-я ЮБИЛЕЙНАЯ КАЗАХСТАНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА “СТРОИТЕЛЬСТВО”



22-24 мая • 2013
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР "КОРМЕ"
АСТАНА • КАЗАХСТАН

- СТРОИТЕЛЬСТВО
- ИНТЕРЬЕР
- ДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ
- ОКНА И ДВЕРИ, ФАСАДЫ
- КЕРАМИКА И КАМЕНЬ





www.astanabuild.kz



ITE Group Plc: London, UK, Tel.: +44 (0) 207 596 5004; Fax: +44 (0) 207 596 5204;
 E-mail: building@ite-exhibitions.com

Itesa (Астана) - Астана, Казахстан, 010000, ул. Агыбай батыра, 5, оф. 23,
 Тел.: +7 7172 58 02 55; Факс.: +7 7172 58 02 53; E-mail: astanabuild@iteca.kz

Itesa (Алматы) - Алматы, Казахстан, 050057, ул. Тимирязева, 42, 2 этаж,
 Тел.: +7 727 2583434; Факс: +7 727 2583444; E-mail: build@iteca.kz