

Николай Павлович БЛЕЩИК,  
доктор технических наук,  
профессор,  
главный научный сотрудник  
РУП "Институт БелНИИС"

Денис Валентинович КОРЫСТИН,  
аспирант,  
младший научный сотрудник  
РУП "Институт БелНИИС"

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОСТАВА НЕАВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

### METHODS OF NON-AUTOCCLAVE POROUS CONCRETE MIX DESIGN

Представлены результаты анализа известных методов подбора состава ячеистого бетона. Приведены экспериментальные данные о влиянии свойств и содержания компонентов ячеистого бетона на технологические характеристики ячеистой бетонной смеси, плотность и прочность ячеистого неавтоклавного бетона. Описана последовательность расчета состава пено- и газобетона.

The analysis of the known methods of porous concrete mix design has been presented. The experimental data have been given concerning the effects of porous concrete properties and component composition on the technological characteristics of porous concrete mix, density and strength of non-autoclave porous concrete. The sequence of mix design procedure has been described for expanded concrete and gas concrete mix.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют различные методики расчета состава ячеистого бетона [1–5]. В источнике [1] рассматривается расчет компонентов ячеистобетонной смеси, основанный на использовании песчаного шлама, полученного при мокром помоле кремнеземистого компонента. Данный метод расчета не позволяет рассчитывать состав бетонной смеси при использовании сухих наполнителей. Также недостатком этого метода является то, что расход газообразователя задается конкретным диапазоном и не зависит от физических параметров среды, в которой происходит вспучивание газобетонной смеси. В источниках [2, 3] подбор состава осуществляется по заранее заданным водо-твердым отношениям, соответствующим определенной плотности бетона. В данном случае не принимается во внимание использование добавок-пластификаторов, влияющих на подвижность бетонных смесей.

Из анализа методик расчета состава ячеистого бетона, приведенных в работах [1–5], можно сделать вывод о том, что пока нет единства во взглядах и в методах расчета ячеистого бетона. Кроме того, методики расчета, представленные в [1–5], имеют ряд других недостатков:

- не учитываются наличие химически связанной воды и степень гидратации вяжущего;
- не принимаются в расчет параметры окружающей среды, в которой происходит вспучивание и твердение ячеистого бетона;
- количество газообразователя не рассчитывается, а фактически задается.

В этой связи представляется целесообразным уточнить методику расчета состава ячеистого бетона с учетом результатов экспериментально-теоретических исследований, выполненных в последнее время.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА СОСТАВА ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Имеется множество методик расчета состава ячеистого бетона [1–5]. Рассмотрим расчет количества вяжущего вещества по данным методикам.

В [1] расчет цемента производится по формуле

$$Ц = P_c \cdot \frac{K_u}{100}, \quad (1)$$

где  $P_c$  — количество сухих компонентов, кг;  
 $K_u$  — содержание цемента, % от  $P_c$ .

В [2] приводится аналогичная формула

$$P_{ц} = P_{\text{вяж}} \cdot n, \quad (2)$$

где  $P_{\text{вяж}}$  — масса вяжущего, кг;  
 $n$  — доля цемента в смешанном вяжущем.

В вышеприведенных формулах количество цемента фактически не рассчитывается, а задается. В [3] количество вяжущего определяется по формуле

$$P_{\text{вяж}} = \frac{P_{\text{сух}}}{K_c \cdot (1 + C_{\text{пц}})}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{сух}}$  — масса (количество) сухих материалов, кг;  
 $K_c$  — коэффициент количества химически связанной воды по отношению к массе сухих компонентов смеси (для предварительных расчетов принимается равным 1,1);  
 $C_{\text{пц}}$  — отношение массы песка к массе цемента.

В [4] количество цемента определяется по формуле

$$Ц = \frac{P_6}{1,15 + C_{\text{пц}}}, \quad (4)$$

где  $P_6$  — средняя плотность ячеистого бетона, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_{\text{пц}}$  — соотношение между наполнителем и цементом.

Из анализа формул (3) и (4) можно сделать вывод о том, что количество химически связанной воды в них учитывается постоянными коэффициентами и в связи с этим не учитываются свойства вяжущего и условия формирования структуры ячеистого бетона. Кроме того,

приведенные в [1–5] методики расчета состава ячеистого бетона, не учитывают таких важных факторов, существенно влияющих на физико-механические свойства бетона, как прочность на сжатие, пластические свойства ячеистобетонной смеси, вид и количество химических модификаторов, содержание минеральных тонкодисперсных наполнителей и дисперсных армирующих волокон.

Эти и другие факторы обусловили необходимость проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований, на основе которых была разработана новая методика расчета состава ячеистого бетона, представленная в настоящей статье.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА СОСТАВА НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА**

Выполненный комплекс экспериментально-теоретических исследований позволил обоснованно принимать и рассчитывать основные параметры ячеистой бетонной смеси и затвердевшего ячеистого бетона исходя из заданных его плотности и прочности на сжатие.

Вначале определяется рациональное отношение массы дисперсного наполнителя к массе твердых веществ  $n$  по формуле

$$n = \frac{G_{дн}}{G_{вяж} + G_{дн}}, \tag{5}$$

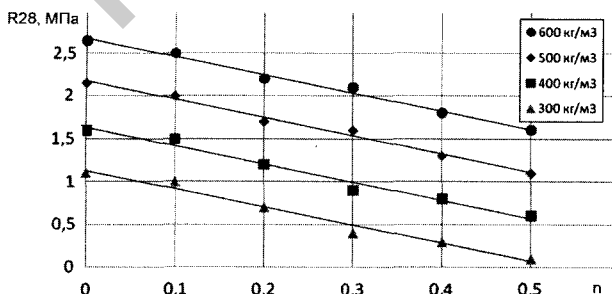
где  $G_{вяж}$  — рациональный расход вяжущего, кг на  $1 \text{ м}^3$  ячеистого бетона;

$G_{дн}$  — рациональный расход дисперсного наполнителя, кг на  $1 \text{ м}^3$  ячеистого бетона.

Определение значений  $G_{вяж}$ ,  $G_{дн}$  и соответственно  $n$  осуществляется по графику зависимости прочности ячеистого бетона от числа  $n$ , исходя из необходимости обеспечения наименьших экономических затрат при заданных плотности и прочности бетона. График строится для заданного вида наполнителя и вяжущего.

На рис. 1 представлен график, действительный для цементов марки ПЦ 500-Д0 производства белорусских предприятий, доломитовой муки производства ОАО "Доломит", либо песка с  $M_k = 1$  и менее. В качестве пенообразователя использовался ПБ-2000 производства ОАО "Ивхимпром", фибры — полипропиленовое волокно ВАП производства ПМТС "Спецнаб", г. Днепропетровск, в количестве 1 кг на  $1 \text{ м}^3$  ячеистого бетона.

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных, представленных на рис. 1, получена следующая зависимость:



**Рис. 1.** Влияние количества наполнителя на прочность неавтоклавнового ячеистого бетона различной плотности

$$R_{28} = (5,3 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_6 - 2,1n - 0,49) \cdot K_b, \tag{6}$$

где  $\rho_6$  — плотность ячеистого бетона в сухом состоянии;

$K_b$  — коэффициент учета роста прочности ячеистого бетона в 28-суточном возрасте при введении дисперсного волокна.

Для конкретного типа волокна прирост прочности будет различным. Для полипропиленового волокна ВАП производства ПМТС "Спецнаб", г. Днепропетровск, значения коэффициента  $K_b$  представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

Волокно ВАП, кг/м³ бетона	1,0	1,5	2,5
$K_b$	1,0	1,2	1,3

Далее рассчитывается количество вяжущего вещества  $G_{вяж}$ , кг, включая цемент и тонкодисперсные наполнители, по формуле

$$G_{вяж} = \frac{\rho_6}{1 + \alpha_m \cdot m_{хсв} + \frac{n}{1-n}}, \tag{7}$$

где  $\rho_6$  — то же, что в формуле (6);

$\alpha_m$  — степень гидратации вяжущего, принимаемая для цементов белорусских предприятий равной 0,7 согласно [6];

$m_{хсв}$  — объемная концентрация химически связанной воды, принимаемая равной 0,227 согласно [6].

Рассчитывается количество дисперсного наполнителя  $G_{дн}$ , кг, по формуле

$$G_{дн} = \frac{n \cdot G_{вяж}}{1-n}. \tag{8}$$

Рассчитывается требуемый объем пены (газа) на  $1 \text{ м}^3$  ячеистого бетона по формуле

$$V_n = V_6 \cdot \left( \frac{\alpha \cdot G_{вяж}}{\rho_{вяж}} + \frac{G_{дн}}{\rho_{дн}} + \frac{\alpha \cdot G_{вяж} \cdot m_{хсв}}{1000} \right), \tag{9}$$

где  $V_6$  — объем ячеистого бетона в сухом состоянии, принимаемый для расчетов равным  $1 \text{ м}^3$ ;

$\alpha$  — то же, что в формуле (7);

$\rho_{вяж}$  — истинная плотность вяжущего, кг/м³;

$\rho_{дн}$  — истинная плотность дисперсного наполнителя, кг/м³.

Количество раствора пенообразователя  $G_{по}$ , л, рассчитывается по формуле

$$G_{по} = \frac{V_n}{K}, \tag{10}$$

где  $K$  — кратность пенообразователя, зависящая от вида пенообразователя;

концентрации раствора пенообразователя.

Кратность пенообразователя определяется опытным путем и рассчитывается по формуле

$$K = \frac{\rho_p}{\rho_n}, \tag{11}$$

где  $\rho_p$  — плотность раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_n$  — плотность пены, кг/м<sup>3</sup>.

Количество добавки-пластификатора в виде раствора  $G_d$  рассчитывается по формуле

$$G_d = \frac{G_{\text{вяж}} \cdot D_d}{C_d}, \quad (12)$$

где  $G_{\text{вяж}}$  — то же, что в формуле (7);  
 $D_d$  — дозировка добавки-пластификатора, % от вяжущего;  
 $C_d$  — концентрация раствора добавки-пластификатора, % по массе.

Общее количество воды подбирается экспериментально в зависимости от подвижности бетонной смеси, которая в свою очередь зависит от плотности бетона. Необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что введение волокна уменьшает подвижность бетонной смеси и, следовательно, требуется корректировка состава по воде или добавке-пластификатору.

Далее рассчитывается общее количество воды  $V_{\text{общ}}$ , идущее на приготовление бетонной смеси:

$$V_{\text{общ}} = (V_{\text{хсв}} + V_{\text{по}} + V_{\text{доб}} + V_n + V_{\text{им}}) \cdot (1 - K_{\text{пл}}), \quad (13)$$

где  $V_{\text{хсв}}$  — количество химически связанной воды, л;  
 $V_{\text{по}}$  — количество воды, содержащейся в растворе пенообразователя, л;  
 $V_{\text{доб}}$  — количество воды, содержащейся в растворе добавки, л;  
 $V_n$  — количество воды, абсорбированной дисперсным наполнителем, л;  
 $V_{\text{им}}$  — количество воды, иммобилизованной вяжущим, л;  
 $K_{\text{пл}}$  — коэффициент пластификации вяжущего.

Количество химически связанной воды определяется по формуле

$$V_{\text{хсв}} = G_{\text{вяж}} \cdot \alpha \cdot m_{\text{хсв}}, \quad (14)$$

где  $G_{\text{вяж}}$  — то же, что в формуле (7).

Количество воды, содержащейся в растворе пенообразователя  $V_{\text{по}}$ , рассчитывается по формуле

$$V_{\text{по}} = G_{\text{по}} \cdot (1 - C_{\text{по}}), \quad (15)$$

где  $G_{\text{по}}$  — то же, что в формуле (10);  
 $C_{\text{по}}$  — концентрация пенообразователя в растворе пенообразователя, масс. доли.

Количество воды, содержащейся в добавке-пластификаторе  $V_{\text{доб}}$ , рассчитывается по формуле

$$V_{\text{доб}} = G_{\text{доб}} \cdot (1 - C_{\text{доб}}), \quad (16)$$

где  $G_{\text{доб}}$  — количество раствора добавки-пластификатора, л;  
 $C_{\text{доб}}$  — концентрация добавки в растворе добавки-пластификатора, масс. доли.

Количество воды, абсорбированной дисперсным наполнителем  $V_n$ , рассчитывается по формуле

$$V_n = W_n \cdot \frac{G_n}{100}, \quad (17)$$

где  $W_n$  — водопоглощение дисперсного наполнителя, %;  
 $G_n$  — количество дисперсного наполнителя, кг.

Количество воды, иммобилизованной вяжущим  $V_{\text{им}}$ , рассчитывается по формуле

$$V_{\text{им}} = G_{\text{вяж}} \cdot 0,92 K_{\text{нгм}}, \quad (18)$$

где  $K_{\text{нгм}}$  — коэффициент нормальной густоты модифицированного вяжущего, зависящий от вида вяжущего и дозировки и вида добавки-пластификатора.

Коэффициент пластификации вяжущего  $K_{\text{пл}}$  рассчитывается по формуле

$$K_{\text{пл}} = \frac{K_{\text{нг}} - K_{\text{нгм}}}{K_{\text{нг}}}, \quad (19)$$

где  $K_{\text{нг}}$  — коэффициент нормальной густоты вяжущего, зависящий от вида вяжущего.

Подвижность бетонных смесей выбирается из графика зависимости распыла бетонной смеси РС по вискозиметру Суттарда от плотности ячеистого бетона, представленному на рис. 2. При введении различных пластифицирующих добавок в бетонную смесь подвижность ее меняется в зависимости от типа и дозировки добавки. На рис. 2 представлены результаты экспериментов для добавки Реламикс тип-2 производства ООО "ПолипластХИМ".

В результате обработки данных по рис. 2 получена следующая зависимость

$$PC = -0,04 \rho_b + K_d, \quad (20)$$

где  $\rho_b$  — то же, что в формуле (6);  
 $K_d$  — коэффициент, зависящий от дозировки добавки-пластификатора, который определяется по формуле

$$K_d = 10D + 50, \quad (21)$$

$D$  — дозировка добавки Реламикс тип-2, % от массы вяжущего.

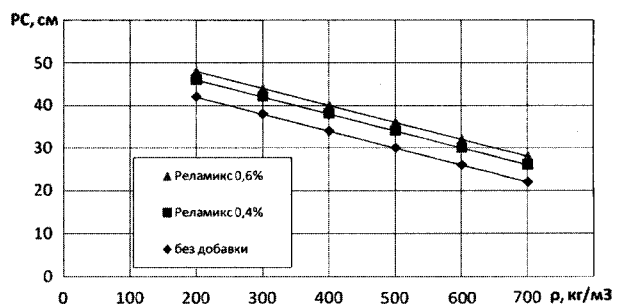


Рис. 2. Влияние дозировки добавки-пластификатора на подвижность бетонной смеси

Подставив выражение (21) в (20), получим общую формулу для вычисления подвижности бетонной смеси

$$PC = -0,04\rho_6 + 10D + 50. \quad (22)$$

### ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СОСТАВА НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Методика расчета состава неавтоклавнога газобетона включает в себя те же стадии, что и при расчете пенобетона, но при некоторых отличиях. Определяется количество газообразователя (алюминиевой пудры или пасты), по формуле

$$G_r = \frac{0,018V_r \cdot P_n}{RT C_{ал}} \cdot 100, \quad (23)$$

где  $V_r$  — объем газа в бетоне, м<sup>3</sup>;  
 $P_n$  — давление внутри пузырька газа, Па;  
 $C_{ал}$  — содержание активного металла в газообразователе, %;  
 $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);  
 $T$  — температура среды, в которой происходит вспучивание бетонной смеси, К.

Давление внутри пузырька газа  $P_n$  определяется по формуле

$$P_n = \rho_{бсм} \cdot 9,8h_\phi + P_{атм}, \quad (24)$$

где  $\rho_{бсм}$  — плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $h_\phi$  — высота формы, м;  
 $P_{атм}$  — атмосферное давление, принимаемое для расчетов равным 101 325 Па.

После определения количества газообразователя  $G$ , необходимо определить количество воды  $V_{сусп}$ , которое пойдет на приготовление алюминиевой суспензии

$$V_{сусп} = 5G_r. \quad (25)$$

Общее количество воды на замес необходимо откорректировать с учетом воды в суспензии. При необходимости активации газообразователя и регулирования скорости вспучивания бетонной смеси в бетонную смесь вводится щелочь. Количество щелочи  $G_{щ}$  вычисляется по формуле

$$G_{щ} = 0,05G_{вяж}. \quad (26)$$

Разработанная методика расчета состава ячеистого бетона была апробирована при организации опытного производства изделий из пенобетона на РУП "СМТ № 22", г. Полоцк, и изделий из газобетона на ЧСТУП "Цемекс", г. Гомель.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 В результате анализа известных методов проектирования и подбора состава пено- и газобетонов неавтоклавнога производства показано, что применяемые расчетные модели не учитывают многих факторов, существенно влияющих на результаты расчета состава.
- 2 Представлены результаты комплекса экспериментально-теоретических исследований влияния свойств вяжущего, вида и содержания минеральных и химических добавок, полимерных волокон, технологических режимов изготовления изделий из ячеистого неавтоклавнога бетона на его технологические и физико-механические свойства.
- 3 На основе результатов исследований разработана новая методика проектирования состава неавтоклавных пено- и газобетонов.
- 4 Разработанная методика проектирования состава ячеистого неавтоклавнога бетона апробирована на предприятиях по безавтоклавному производству изделий из пено- и газобетона плотностью 400 и 500 кг/м<sup>3</sup>, удовлетворяющих требованиям СТБ 1117 [7] и СТБ 1570 [8].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сажнев, Н. П. Производство ячеистобетонных изделий: теория и практика / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич, Л. В. Соколовский. — Минск: Стринко, 1999. — 284 с.
2. Портник, А. А. Все о пенобетоне / А. А. Портник. — СПб., 2003. — 224 с.
3. Махамбетова, У. К. Уточненный метод подбора состава пенобетона / У. К. Махамбетова, З. А. Естемесов // Цемент и его применение. — 1995. — № 3. — С. 30, 31.
4. Кудяков, А. И. Проектирование неавтоклавнога пенобетона / А. И. Кудяков, Д. А. Киселев // Строительные материалы. — 2006. — № 8. — С. 8, 9.
5. Гершберг, О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий / О. А. Гершберг. — М.: Стройиздат, 1965. — 320 с.
6. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор. — М.: Мир, 1996. — 560 с.
7. Блоки из ячеистых бетонов. Технические условия: СТБ 1117-98. — Введ. 01.04.1999.
8. Бетоны ячеистые. Технические условия: СТБ 1570-2005. — Введ. 01.07.2006.

Статья поступила в редакцию 02.12.2010.