

УДК 624.04

*Вылегжанин В.П., кандидат технических наук,  
директор*

*Пинскер В.А., кандидат технических наук,  
научный руководитель*

*Центр ячеистых бетонов, Россия, г. Санкт-Петербург*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АРМИРОВАННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АВТОКЛАВНЫХ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ И СРЕЗЕ, НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ

В Ленинграде – Санкт-Петербурге уже более 50 лет ведутся исследования по разработке теории прочности и деформаций автоклавных ячеистых бетонов и конструкций из них на базе завода газобетона польской поставки (Домостроительный комбинат № 3 – ДСК-3).

Структура газобетона была представлена в виде совокупности сферических оболочек гексагональной упаковки, разрушающихся от растягивающих усилий по «экватору» сфер, что объясняет хрупкую природу разрушения [1]. Эта работа нашла понимание в Польше [2] и в Академии наук [3] по разделу физико-химической механики. Дальнейшие исследования конструкций, изготовленных на польском оборудовании (Ленинград, Пенза, Павлодар, Ижевск, Темир-Тау и др.), показали, что повышенная их прочность против формул сопротивления материалов, из-за их хрупкости не может быть объяснена параболической, трапецевидной или даже прямоугольной эпюрой напряжений в сжатой зоне изгибаемых и внецентренно сжатых элементов. Тогда было использовано понятие моментных напряжений несимметричной теории упругости, предложенной братьями Коссера [4]. Замеряемый градиент деформаций вызывается равномерно распределенными по сечению моментными напряжениями. Разрушение автоклавного ячеистого бетона происходит тогда, когда упругая энергия от совместного действия равномерно распределенных нормальных, моментных и сдвиговых напряжений достигнет предела энергоемкости материала, определяемого по результатам осевых испытаний призм [4-6]. Использование этой методологии позволило получить формулы для расчета при разных видах напряженного состояния армированных и неармированных конструкций из автоклавных ячеистых бетонов. Полученные результаты расчета показали полное совпадение с результатами расчета по эмпирическим формулам (Пособие к СНиП 2.03.01-84 [10]) и экспериментов [7]. Это дало основание разработать методику расчета армированных изгибаемых газобетонных изделий на прочность при изгибе и срезе, на трещиностойкость и деформации без использования эмпирических коэффициентов [8], [9]. Эта методика приведена ниже.

Расчет по прочности сечений изгибаемых газобетонных балочных элементов производят из условия:

$$M \leq M_{ult},$$

где  $M_{ult}$  – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением элемента;

$M$  – действующий максимальный момент для двухопорной балки:

$$M = \frac{qbl_0^2}{8}, \quad (1)$$

где  $q$  – расчетная равномерно распределенная нагрузка, включающая собственный вес перекрытия, кг/м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина изгибаемого элемента, м;  $l_0$  – расчетный пролет перекрытия, м.

Разрушение пролетных сечений происходит в сечении с трещиной по двум схемам:

1) от текучести или разрыва арматуры без разрушения газобетона сжатой зоны или при разрушении его после заметной текучести стали (прогиб более  $l_0/50$ ).

2) от раздробления и хрупкого разрушения сжатой зоны без заметных пластических деформаций (нелинейных) растянутой арматуры.

Напряженное состояние сжатой зоны в середине пролета (над трещиной) принимается однородным, вызываемым суммой энергий моментных и нормальных напряжений, равномерно распределенных по площади сжатой зоны, и приравниваемой энергии разрушения призм (при осевом сжатии).

Разрушающий момент для прямоугольного сечения определяется по формуле:

$$M_{ult} = \sqrt{\frac{3}{7}} R_b b h_0^2 \left[ \xi \left( 1 - \frac{\xi}{3} \right) + \sqrt{\frac{7}{3}} \mu' \frac{R_{sc}}{R_b} (1 - \delta') \right], \quad (2)$$

где при разрушении по арматуре:

$$\xi = \xi_{arm} = \frac{x}{h_0} = \sqrt{\frac{7}{3}} \mu \frac{R_s}{R_b} (1 - f_s r_s), \quad (3)$$

при разрушении по бетону:

$$\xi = \xi_b = \mu \alpha (1 + f_s r_s) \left[ \sqrt{1 + \frac{2(1 + f_s r_s \delta')}{\mu \alpha (1 + f_s r_s)^2}} - 1 \right], \quad (4)$$

где  $f_s = \frac{A'_s}{A_s} = \frac{A'_s}{b h_0} : \frac{A_s}{b h_0} = \frac{\mu'}{\mu}$ ;  $r_s = \frac{R_{sc}}{R_s} = \frac{\sigma'}{\sigma_T}$ ;  $\delta' = \frac{a'}{h_0}$ ;  $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$ .

$A'_s$  – площадь поперечного сечения сжатой арматуры, м<sup>2</sup>;

$A_s$  – площадь поперечного сечения растянутой арматуры, м<sup>2</sup>;

$R_{sc}$  – расчетное сопротивление сжатой арматуры (в газобетоне), кг/м<sup>2</sup>;

$R_s$  – расчетное сопротивление растянутой арматуры, кг/м<sup>2</sup>;

$R_b$  –  $R_b \cdot 0,7225$  – расчетное сопротивление газобетона сжатию, умноженное на коэффициент 0,85 при влажности по массе от 25 % и выше и коэффициент длительной нагрузки 0,85; кг/м<sup>2</sup>

$\sigma'$  – напряжение в сжатой арматуре, кг/м<sup>2</sup>;

$\sigma_T$  – предел текучести арматуры, кг/м<sup>2</sup>;

$a'$  – расстояние от верхней грани поперечного сечения до оси сжатой арматуры, м;

$E_s$  – модуль упругости арматуры, кг/м<sup>2</sup>;

$E_b$  – начальный модуль упругости газобетона, кг/м<sup>2</sup>;

$\mu'$  – коэффициент армирования сжатой зоны;

$\mu$  – коэффициент армирования растянутой зоны;

$h_0$  – рабочая высота сечения (расстояние от верхней грани сечения элемента до оси растянутой арматуры), м;

Если  $\xi_{arm} > \xi_b$ , то разрушение происходит по газобетону;

если  $\xi_{arm} < \xi_b$ , то – по арматуре; при  $\xi_{arm} = \xi_b$  происходит одновременное разрушение по газобетону и арматуре.

Прогиб рассчитывается исходя из рассмотрения действия постоянных и длительных нагрузок. Расчет прогибов от действия длительных нагрузок позволяет учитывать ползучесть газобетона.

Прогиб зависит от жесткости изделия. Минимальная жесткость изделия по сечению над трещиной вычисляется по формуле:

$$B_{\min} = E_b \cdot b \cdot h_0^3 \cdot e, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (5)$$

где

$$e = \frac{\xi_b^3}{3} + \mu\alpha \left[ (1 - \xi_b)^2 + f_s (\xi_b - \delta')^2 \right], \quad (6)$$

$\xi_b$  - по формуле (4).

$R_{bn} = R_b \cdot 0,7225$  – нормативное сопротивление газобетона сжатию с учетом влажности и длительности, кг/м<sup>2</sup>.

Максимальная жесткость (по сечению между трещинами):

$$B_{\max} = E_b b h^3 e_1, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (7)$$

где  $h$  – высота сечения (толщина панели), м;

$$e_1 = \frac{1}{12} + (\xi_1 - 0,5)^2 + \mu_1\alpha \left[ (1 - \xi_1 - \delta_1)^2 + f_s (\xi_1 - \delta_1')^2 \right], \quad (8)$$

и

$$\xi_1 = \frac{x}{h} = \frac{\mu_1\alpha(1 - \delta_1 + f_s\delta_1') + 0,5}{1 + \mu_1\alpha(1 + f_s)}, \quad (9)$$

причем

$$\mu_1 = \frac{A_s}{bh}; \quad \delta_1 = \frac{a}{h}; \quad \delta_1' = \frac{a'}{h}.$$

$a$  – расстояние от нижней грани поперечного сечения до оси растянутой арматуры, м;  
Жесткость при изгибающем моменте  $M$  определяется по формуле:

$$B = B_{\max} \Psi, \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (10)$$

где

$$\Psi = 1 - \left( 1 - \frac{B_{\min}}{B_{\max}} \right) \frac{M_n - M_{cr}}{M_{ult} - M_{cr}}, \quad (11)$$

$$M_n = \frac{M}{1,2}, \text{ кг}\cdot\text{м}, \quad (12)$$

$M_{ult}$  – разрушающий момент по формуле (2) при  $\xi = \xi_b$  (формула 4), кг·м;

$M_{cr}$  – момент трещинообразования, кг·м;

$$M_{cr} = \frac{R_{btm} b h^2 e_1}{j}, \quad (13)$$

где  $e_1$  – по формуле (8);

$R_{btm} = R_{btm} \cdot 0,7225$  – нормативная прочность газобетона на растяжение с учетом влажности и длительности, кг/м<sup>2</sup>;

$$j = \sqrt{\frac{1}{12} - 0,5(\xi_1 - 0,5)}. \quad (14)$$

Прогиб  $f$  армированных элементов с учетом ползучести определяют по формуле:

$$f = f_1 + 0,6f_2, \text{ м}, \quad (15)$$

где  $f_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_d \cdot b \cdot l_0^4}{B}$  – прогиб от нормативной нагрузки, м;

$f_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{dl} \cdot b \cdot l_0^4}{B}$  – прогиб от длительной нагрузки, м;

$q_d = 1,1 \cdot h \cdot D + 0,833p$  – постоянная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>;

$q_{dl} = 1,1 \cdot h \cdot D + p_1$  – длительная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>, где  $p_1 = 50 + 30 = 80$  кг/м<sup>2</sup> – часть полезных нагрузок длительного действия для жилых и общественных зданий.

$D$  – марка газобетона по средней плотности, кг/м<sup>3</sup>.

Прогибы изгибаемых газобетонных изделий не должны превышать предельно допустимой величины при  $l_0 < 6$  м:

$$\frac{l_0}{f} \geq 200$$

Ширина раскрытия трещин определяется по формуле:

$$a_{crc} = \frac{M_n h_0^2}{B_{min}} (1 - \xi_b)^2 \cdot 1,6, \text{ м} \quad (16)$$

где  $\xi_b$  находится из зависимости (4),  $B_{min}$  – из зависимости (5).

Минимальный момент трещинообразования рассчитывается по формуле:

$$M_{crc} = \frac{R_{bt} b h^2 e_1}{\sqrt{\frac{1}{3} - 0,5 \xi_1}}, \text{ кг}\cdot\text{м}, \quad (17)$$

где  $R_{bt} = R_{bt} \cdot 0,7225$  – расчетная прочность газобетона на растяжение с учетом влажности и длительности, кг/м<sup>2</sup>;

$e_1$  определяется по формуле (9), а  $\xi_1$  – по формуле (10).

Расстояние начала трещины от оси опоры  $a_t$  рассчитывается по формуле

$$a_t = \frac{M_{crc}}{Q_{max}}, \text{ м}, \quad (18)$$

Расчет прочности опорных сечений производится из условия

$$Q_{max} \leq Q_{ult}, \quad (19)$$

где  $Q_{max}$  – расчетная максимальная поперечная сила,

$$Q_{max} = \frac{q b l_0}{2}, \text{ кг}, \quad (20)$$

$Q_{ult}$  – предельная прочность опорных сечений на срез вычисляется по формуле:

$$Q_{ult} = \frac{R_b b h_0 \xi}{\sqrt{\frac{21(a_{sh}/h_0)^2}{(3 - \xi_b)^2} + 1,7}}, \text{ кг}, \quad (21)$$

где  $a_{sh}/h_0$  – пролет среза,  $a_{sh} = a_t + h_0$ ;

$\xi_b$  – относительная высота сжатой зоны, определяемая по формуле (4).

Требуемая анкеровка растянутой продольной арматуры определяется по выдергивающей силе на опоре

$$N_a = \frac{Q_{\max} \cdot \left( \frac{a_t}{h_0} + 1 \right)}{1 - \frac{\xi}{3}}, \text{ кг}, \quad (22)$$

$\xi_b$  – определяется по формуле (4),  $Q_{\max}$  – по формуле (18).

Расчетная несущая способность анкерных стержней рассчитывается по формуле

$$N_{an} = n \cdot (5 \cdot n_a \cdot d_a^2 \cdot R_b \cdot \sqrt[3]{\alpha} + 2,5 \cdot a_t \cdot R_{bt} \cdot \pi \cdot d) \text{ , кг}, \quad (23)$$

где  $n_a$  – количество поперечных анкерующих стержней;

$d_a$  – диаметр анкерующих стержней, м;

$n$  – количество анкеруемых продольных стержней;

$d$  – диаметр продольных стержней, м.

Анкеровка считается достаточной, если

$$N_a \leq N_{an} .$$

Для выполнения расчета армированных изделий задаются следующие исходные данные:

- характеристики газобетона:
- марка по плотности  $D$ , класс бетона по прочности  $B$  [8];
- расчетная нагрузка  $q$ ;
- размеры изделия:  $b$  – ширина;  $l_0$  – расчетный пролет изделия;  $h$  – высота сечения;  $h_0$  – расчетная высота сечения;
- модуль упругости арматуры  $E_s$  [10];
- модуль упругости газобетона  $E_b$  [8];
- расчетное сопротивление арматуры сжатой  $R_{sc}$  и растянутой  $R_s$  [10];
- расчетное сопротивление газобетона сжатию  $R_b$  [8];
- предел текучести арматуры  $\sigma_T$  [10].

При расчете изделий по вышеприведенным формулам задаются их армированием в сжатой и растянутой зонах до удовлетворения допустимых значений.

1.  $M \leq M_{ult}$  - по изгибающим моментам;
2.  $\frac{l_0}{f} \geq 200$  - по прогибам;
3.  $\alpha_{cr} \leq 0,05$  - по ширине раскрытия трещины;
4.  $Q_{\max} \leq Q_{ult}$  - по поперечной силе;
5.  $N_a \leq N_a$  - по анкеровке арматуры.

Изложенная методика расчета использована для разработки рабочих чертежей стеновых панелей, панелей перекрытий, покрытий и перемычек из автоклавного газобетона различных классов по прочности на сжатие и марок по плотности различных толщин и пролетов для жилых и общественных зданий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пинскер В. А. Некоторые вопросы физики ячеистого бетона. – В кн.: Жилые дома из ячеистого бетона. – Л.: Госстройиздат, 1963. – С. 123 – 145.
2. Paprocki A. Betony komorkowe. – Warszawa: Wydawnictwo Arkady, 1966. – 184 с.
3. Ребиндер П.А., Пинскер В.А. К оптимизации технологии производства конструкций из ячеистых бетонов. – В кн.: Ячеистые бетоны. – Л., 1968/ЛенЗНИИЭП, Госгражданстрой. – С. 3-19.
4. Пинскер В.А. Градиентное повышение прочности ячеистого бетона в свете моментной теории упругости и несущая способность настилов с двойной арматурой. – В кн.: Исследование ячеистобетонных конструкций и их применение в жилищно-гражданском строительстве. – Л., 1980 / ЛенЗНИИЭП, Госгражданстрой. – С. 49-64.
5. Пинскер В.А. Совершенствование методов расчета прочности конструкций из автоклавных ячеистых бетонов. – В кн.: Ячеистые бетоны в жилищно-гражданском строительстве. – Л., 1983 / Госгражданстрой. ЛенЗНИИЭП. – С. 47-56.
6. Пинскер В.А. Работа ячеистобетонных конструкций на поперечную силу и образование трещин. – В кн.: Проектирование и расчет строительных конструкций. – Л., 1985 / ЛДНТП. - С. 33 – 42.
7. Пинскер В.А. Вопросы совершенствования применения и расчета конструкций из автоклавных ячеистых бетонов для жилищно-гражданского строительства. – В кн.: Применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве. Л., 1991 / Госкомархитектуры. ЛенЗНИИЭП. – С. 45-52.
8. Стандарт Ассоциации строителей России «Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации» СТО 501-52-01-2007. Издание официальное. – М., 2008 / Разработан Центром ячеистых бетонов. В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер. Ч.І – 42 с., Ч.ІІ – 55 с.
9. Региональный методический документ «Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Санкт-Петербурге» РМД 52-01-2007. Часть II. Издание официальное. Администрация СПб, 2007 /Разработан Центром ячеистых бетонов В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер/.
10. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов (к СНиП 2.03.01-84 Бетонные и железобетонные конструкции)/НИИЖБ, ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.