

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

В.П. Вылегжанин, к.т.н., директор, Центр ячеистых бетонов

В.А. Пинскер, к.т.н., научный руководитель, Центр ячеистых бетонов

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:

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

где q - расчетная равномерно распределенная нагрузка, включающая собственный вес перекрытия, кг/м²;
 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 приравняваемой энергии разрушения призм (при осевом сжатии). Разрушающий момент для прямоугольного сечения определяется по формуле:

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

где при разрушении по арматуре:

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

при разрушении по бетону:

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

$$f_s = \frac{A'_s}{A_s} = \frac{A'_s}{bh_0} \frac{A_s}{bh_0} = \frac{\mu'}{\mu} r_s = \frac{R_{sc}}{R_s} = \frac{\sigma'}{\sigma_T} \delta' = \frac{a'}{h_0} \alpha = \frac{E_s}{E_{\delta}}$$

где
 A'_s - площадь поперечного сечения сжатой арматуры, м²;
 A_s - площадь поперечного сечения растянутой арматуры, м²;
 R_{sc} - расчетное сопротивление сжатой арматуры (в газобетоне), кг/м²;
 R_s - расчетное сопротивление растянутой арматуры, кг/м²;
 $R_b = R_b \cdot 0,7225$ - расчетное сопротивление газобетона сжатию, умноженное на коэффициент 0,85 при влажности по массе от 25 % и выше и коэффициент длительной нагрузки 0,85; кг/м²
 σ' - напряжение в сжатой арматуре, кг/м²;
 σ_T - предел текучести арматуры, кг/м²;
 a' - расстояние от верхней грани поперечного сечения до оси сжатой арматуры, м;
 E_s - модуль упругости арматуры, кг/м²;
 E_b - начальный модуль упругости газобетона, кг/м²;
 μ' - коэффициент армирования сжатой зоны;
 μ - коэффициент армирования растянутой зоны;
 h_0 - рабочая высота сечения (расстояние от верхней грани сечения элемента до оси растянутой арматуры), м;

Если $\xi_{арм} > \xi_{\delta}$, то разрушение происходит по газобетону;

если $\xi_{арм} < \xi_{\delta}$, то - по арматуре; при $\xi_{арм} = \xi_{\delta}$ 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

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

где

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

ξ_{δ} - по формуле (4). (4).

$R_{bn} = R_{bn} \cdot 0,7225$ - нормативное сопротивление газобетона сжатию с учетом влажности и длительности, кг/м².

Максимальная жесткость (по сечению между трещинами):

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

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

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

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

причем

a - расстояние от нижней грани поперечного сечения до оси растянутой арматуры, м;

Жесткость при изгибающем моменте M определяется по формуле:

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

где

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

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

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

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

где $R_{dтн} = R_{dтн} \cdot 0,7225^{e_1}$ - нормативная прочность газобетона на растяжение с учетом влажности и длительности, кг/м²; по формуле (8);

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

Прогиб f армированных элементов с учетом ползучести определяют по формуле:

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

$$f_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{дл} \cdot b \cdot l_0^4}{B}$$

где f_1 - прогиб от нормативной нагрузки, м;

$$f_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{дл} \cdot b \cdot l_0^4}{B}$$

f_2 - прогиб от длительной нагрузки, м;

$$q_{дл} = 1,1 \cdot h \cdot D + 0,833 p$$

$q_{дл}$ - постоянная нагрузка, кг/м²; D - марка газобетона по средней плотности, кг/м³;

p - длительная нагрузка, кг/м², где $p_1 = 50 + 30 = 80$ кг/м² - часть полезных нагрузок длительного действия для жилых и общественных зданий. 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:

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

где ξ_b находится из зависимости (4), B_{\min} - из зависимости (5).

Минимальный момент трещинообразования рассчитывается по формуле:

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

где $R_{\partial t} = R_{\partial t} \cdot 0,7225$ - расчетная прочность газобетона на растяжение с учетом влажности и длительности, кг/м²,
 e_1 определяется по формуле (9), а ξ_1 - по формуле (10).

Расстояние начала трещины от оси опоры a_t рассчитывается по формуле

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

Расчет прочности опорных сечений производится из условия

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

где Q_{max} - расчетная максимальная поперечная сила,

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

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

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

где a_{sk}/h_0 - пролет среза, $a_{sk} = a_t + h_0$;

ξ_b - относительная высота сжатой зоны, определяемая по формуле (4).

Требуемая анкеровка растянутой продольной арматуры определяется по выдергивающей силе на опоре

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

ξ - определяется по формуле (4), Q_{max} - по формуле (18).

Расчетная несущая способность анкерных стержней рассчитывается по формуле

$$N_{ax} = n \cdot (5 \cdot n_a \cdot d_a^2 \cdot R_b \cdot \sqrt{\alpha + 2,5 \cdot a_t \cdot R_{\partial t} \cdot \pi \cdot d}), \quad \text{кг}, \quad (23)$$

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

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

Для выполнения расчета армированных изделий задаются следующие исходные данные:

- характеристики газобетона : марка по плотности D, класс бетона по прочности В [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 σ_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. $a_{cr} \leq 0,05$ - по ширине раскрытия трещины;

4. $Q_{max} \leq Q_{ult}$ - по поперечной силе;

5. $N_a \leq N_{ax}$ - 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. I - 42 с., Ч. II - 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.