

# Теоретические и экспериментальные обоснования методики расчета усилий при вырыве анкеров из газобетона с учетом его прочности и плотности.

*В.П. Вылегжанин*

*К.т.н., директор Центра ячеистых бетонов*

*В.А. Пинскер*

*К.т.н., научный руководитель Центра ячеистых бетонов*

*Г.И. Гринфельд*

*Исполнительный директор Национальной ассоциации производителей автоклавного газобетона*

В настоящее время блоки из автоклавного газобетона широко применяются как в малоэтажном строительстве при возведении стен, так и в многоэтажных зданиях при заполнении железобетонных каркасов. Широкое использование при монтаже и построечной сборки навесных фасадов, фасадной облицовки и других конструкций определяет актуальность вопроса о надежности их крепления с помощью анкеров к газобетонным стенам в зависимости от прочности, плотности газобетона.

С момента широкого применения изделий из автоклавного газобетона испытывались различные виды анкерных креплений с целью определения усилий их выдергивания. Однако никаких теоретических обоснований и формул предложено не было. Проведенные испытания показали, что прочность на срез (перпендикулярно оси анкера) как правило, больше, чем на вырыв (выдергивание). Поэтому осевая прочность, как слабое звено, явилось предметом исследований, так как при использовании анкерных креплений для навесных фасадов последние подвергаются значительным усилиям от ветрового отсоса, доходя до 100 кгс/м<sup>2</sup>, что и определяет необходимость разработки теоретических и практических аспектов прочности на вырыв анкеров из автоклавного газобетона.

Выбор физической модели, описывающей работу анкера при его выдергивании из газобетона, опирается на следующие закономерности, установленные в результате испытаний:

1. Рост предельной величины усилия выдергивания анкера  $N_a$  близок к прямо пропорциональной зависимости от глубины его анкеровки.

2. Предельное усилие выдергивания анкера из газобетона есть суммарное сопротивление сил, препятствующих этому.

Анализ показал, что указанным закономерностям наиболее полно удовлетворяет трехслойная модель связей между поверхностью заанкеренной части анкера и газобетоном. Согласно этой модели сдвиговая податливость по контактной поверхности анкера выше, чем по любой площадке внутри газобетонного массива, что не противоречит

опытным данным. Касательные напряжения сцепления  $\tau_{cw}$ , возникающие по длине заанкеренной части анкера при его выдергивании, в рамках принятой модели численно равны силе сопротивления сдвигу, возникающей на единице площади контакта. Если предположить, что  $\tau_{cw} = \bar{\kappa} \cdot \bar{\Delta}$ , где  $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}(z)$  – продольное смещение анкера в сечении с координатой  $z$  (рис. 1);  $\bar{\kappa}$  – коэффициент жесткости связей, препятствующих сдвигу, то,

решив соответствующее дифференциальное уравнение  $\frac{d^2 \Delta_a}{dz^2} - \alpha^2 \Delta_a = 0$ , где  $\alpha = \sqrt{\frac{4\bar{\kappa}}{E_a \cdot d}}$ ,

$E_a$  – модуль упругости материала анкера,  $d$  – диаметр анкера; согласно работе [8]:

$$\tau_{cu} = \frac{\alpha \cdot N_a \cdot ch \cdot [\alpha \cdot (l_a - z)]}{\pi \cdot d \cdot sh \cdot \alpha \cdot l_a} \quad (1)$$

Выполненный по формуле (1) численный анализ изменения величин касательных напряжений по всей длине  $l_a$  в газобетоне стальных анкеров диаметром от 4 мм и более показал, что их величины меняются незначительно (рис. 1), т.е. эпюра касательных напряжений близка к прямоугольной. Такой характер распределения касательных напряжений позволяет принять, что при расчете усилий  $N_a$  выдергивания анкера газобетонные выступы, образованные профилями анкера, по всей длине его заделки оказывают одинаковое сопротивление. Сдвиговая податливость определяется для профилированного анкера – прочностью и деформативностью газобетона, заполняющего впадины профиля ее поверхности.

В настоящей статье рассматриваются только профилированные анкеры. Прочность их сцепления с газобетоном выше, чем у анкеров с гладкой поверхностью. При определении усилия, воспринимаемого выступом при смятии исходим из результатов численного анализа напряженно-деформированного состояния газобетона, находящегося между выступами профиля анкера. Он показал [3], что линии главных напряжений (рис. 2), возникающих под выступами профиля, по своему характеру схожи с аналогичными линиями, возникающими под цилиндрическим плоским штампом при его вдавливании в хрупкий материал (рис. 2).

Эта аналогия прослеживается и в характере зависимостей между усилиями и смещениями  $(N_a - \Delta)$  (рис.3) при вдавливании штампа [4], вытягивании анкера [5]. Известно, что напряженное состояние бетона под вдавливаемым цилиндрическим штампом, можно охарактеризовать как всестороннее сжатие [4]. Напряжения в материале под штампом достигают значений, соответствующих переходу бетона в пластическое состояние соответствующее его смятию [5]. Это вызывает необратимые смещения штампа, относительная величина которых на порядок выше упругих [6], что позволяет не учитывать в расчетах последние.

С увеличением усилий выдергивания зона пластически деформируемого бетона под штампом увеличивается и, в итоге, приобретает форму криволинейного сегмента (рис. 4), прилегающего к поверхности полусферы диаметром  $d_c \approx d_u$  - диаметру штампа, с высотой примерно равной  $d_u$  [3].

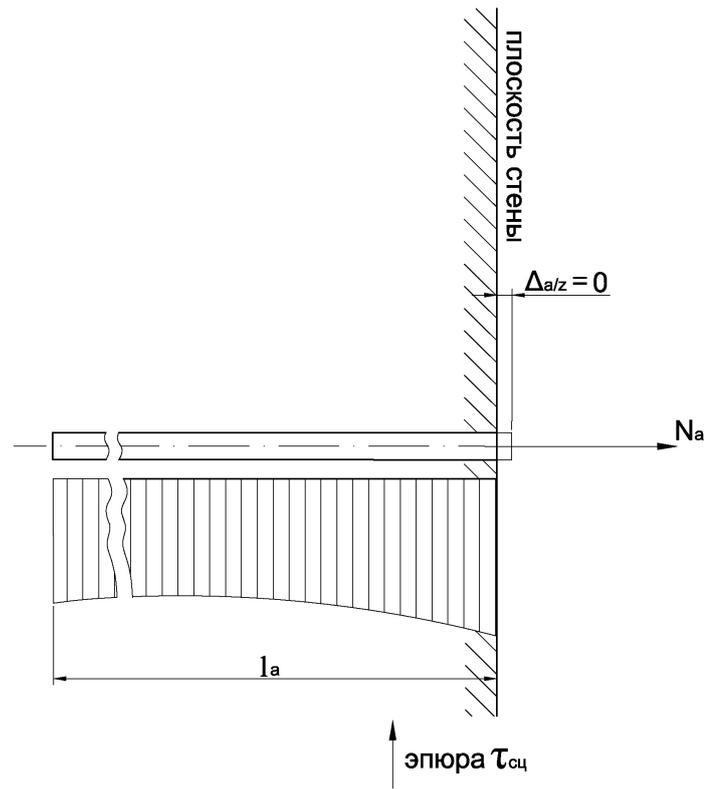


Рисунок 1 - Распределение касательных напряжений  $\tau_{сц}$  по длине части анкера в газобетоне от действия продольной силы  $N_a$ .

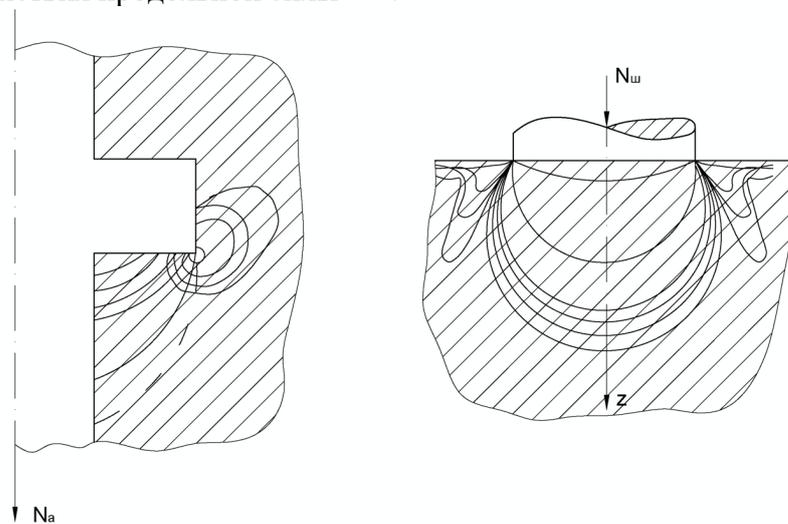


Рисунок 2 - Изолинии главных нормальных напряжений, возникающие:  
а) в бетоне под выступом профиля анкера;  
б) в хрупком материале под жестким плоским цилиндрическим штампом.

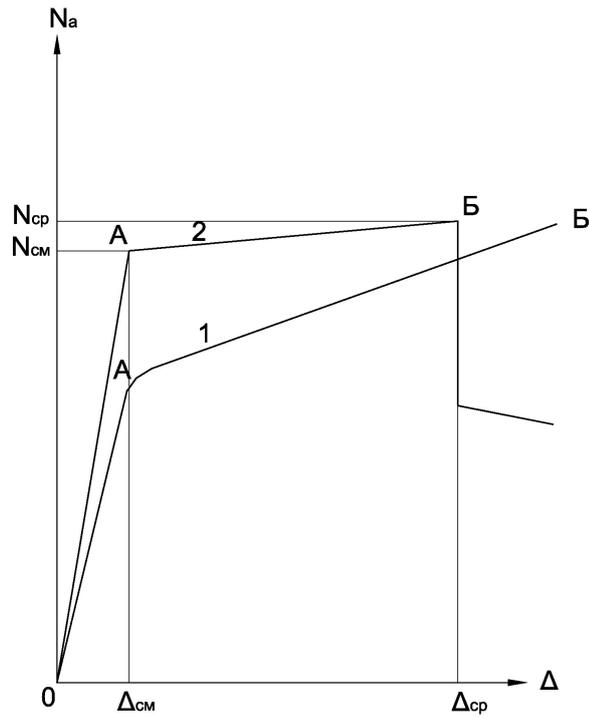


Рисунок 3 - Зависимости смещений от усилий при вдавливании цилиндрического штампа (кривая 1), выдергивании анкера (кривая 2).

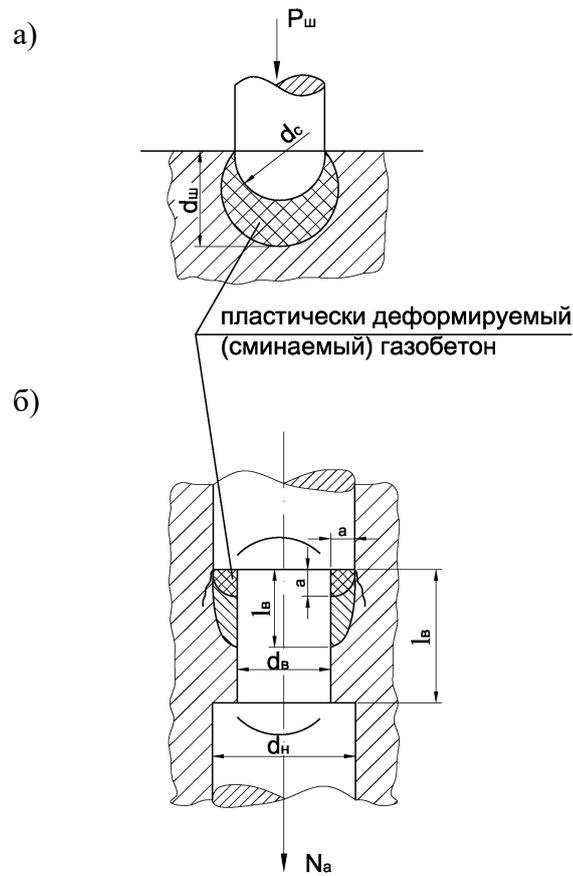


Рисунок 4 - Пластические деформации бетона:  
 а) под цилиндрическим штампом при его выдавливании;  
 б) под выступами профиля анкера при ее вытягивании.

Усилие вдавливания штампа в бетон на этом этапе загрузки, как показали экспериментальные исследования [4], связано с его перемещениями прямолинейной зависимостью (рис. 3, кривая 1, участок 0-А). Дальнейшее возрастание усилия вдавливания приводит к резкому увеличению смещения штампа, излом этой кривой в точке А соответствует образованию радиальных микротрещин (рис. 4) или к дальнейшему разрастанию пластически деформируемой (сминаемой) зоны [5]. Под штампом бетон пластически деформируется, уплотняется (сминается) за счет необратимого вытеснения воздуха из микро- и макропор со сдвигом материала по периметру выступа профиля.

Из аналогии зависимостей  $N_a - \Delta$  (рис.3) и характера линий главных напряжений при вдавливании штампа и выдергивании анкера (рис. 2) следует, что газобетон под выступами его профиля тоже пластически деформируется при некотором значении усилия  $N_a = N_{cm}$ . Объем пластически деформируемого газобетона в процессе вытягивания анкера формируется в виде части вытянутого сегмента эллипсоида, высота которого, исходя из работы [7], [8], может быть принята примерно равной высоте профиля (рис. 4). За счет уплотнения сминаемого газобетона происходит смещение выступа профиля анкера. На кривой  $N_a - \Delta$  (рис. 3) этот момент соответствует ее излому в точке А.

Анкера, применяемые для крепления конструкций, изделий к газобетонным стенам крепятся путем его вворачивания с помощью винтовой нарезанной на нем резьбы (винтового профиля). Анкера или их дюбеля, которые вворачиваются в газобетона в предварительно высверленный канал, относятся к канальным анкерам (рис. 5).

Анкера, которые вворачиваются в газобетон без предварительного высверленного канала, относятся к бесканальным анкерам. К таким анкерам относятся шурупы, саморезы и т.д. (рис. 6)

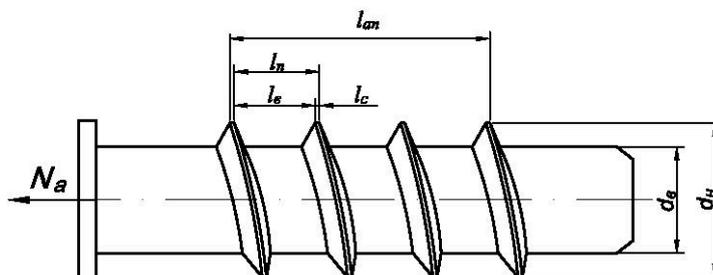


Рисунок 5 – Характерные размеры профиля анкера, используемые при расчете усилий его выдергивания

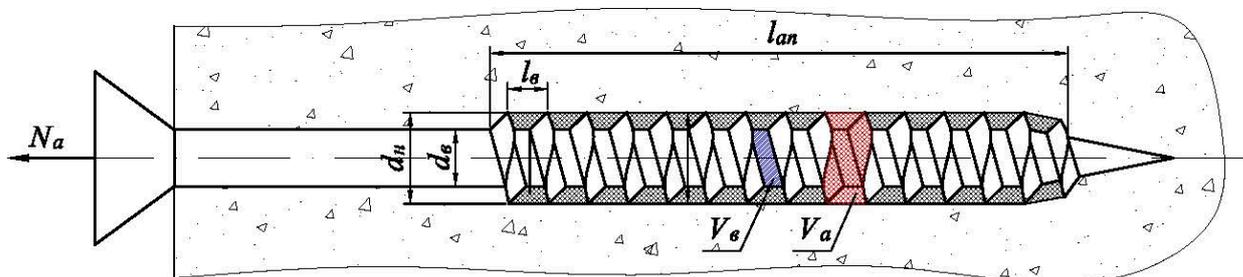


Рисунок 6 – Характерные размеры профиля бесканального анкера, используемые при расчете усилий его выдергивания

### Методика расчета усилий вырыва профилированных канальных и бесканальных анкеров из автоклавного газобетона с учетом его прочности и плотности

Перед расчетом усилий вырыва профилированных анкеров из автоклавного газобетона необходимо знать его:

- марку по плотности  $D$ ;
- класс по прочности на сжатие  $B$ ;
- вес цемента  $P_u$ , извести  $P_n$ , песка  $P_n$ , гипса  $P_z$  в сухом состоянии соответственно используемые при изготовлении этого газобетона;
- объемные веса цемента, извести, песка, гипса в сухом состоянии.

У профилированного анкера тщательно замеряется штангенциркулем следующие размеры:

- $d_n$  – наружный диаметр профиля анкера;
- $d_e$  – внутренний диаметр анкера;
- $l_e$  – расстояние между выступами профиля анкера (длина срезаемого газобетонного выступа);
- $l_{an}$  – длина профилированного участка на заделанном в газобетон анкере;
- $l_n$  – шаг профиля анкера.

Вычисляем максимальную длину газобетонного выступа, при которой он срезается по формуле.

$$l_{e\text{cp}}^{\text{max}} = 1,63d_n \cdot \left(1 - \frac{d_e^2}{d_n^2}\right) \quad (2)$$

Если  $l_e \leq l_{e\text{cp}}^{\text{max}}$ , то принимаем  $l_{e\text{cp}} = l_e$ , газобетон срезается без смятия.

Если  $l_e > l_{e\text{cp}}^{\text{max}}$ , то принимаем  $l_{e\text{cp}} = l_{e\text{cp}}^{\text{max}}$ , газобетон вначале сминается, потом срезается.

Определяем число шагов профиля

$$n = \frac{l_{an}}{l_e} \quad (3)$$

Вычисляем плотность уплотненного газобетона в объеме  $V_a$ :

$$\rho_y = \frac{\rho \cdot l_n}{l_e \cdot K_d}, \quad (4)$$

где  $K_d = 1 - \frac{d_e^2}{d_n^2}$ ;  $\rho = M$ .

Плотность ЦИП камня  $\rho_k$  вычисляется по формуле

$$\rho_k = \frac{\rho}{\frac{P_u}{\gamma_u} + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_z}{\gamma_z}}, \quad (5)$$

где  $P_u, P_n, P_n, P_z$  – веса, цемента, извести, песка, гипса в сухом состоянии соответственно, используемые для изготовления газобетона плотностью  $\rho$ ;

$\gamma_u, \gamma_u, \gamma_n, \gamma_z$  – объемные веса цемента, извести, песка, гипса в сухом состоянии  $\gamma_u = 3100 \text{ кг/м}^3, \gamma_u = 3370 \text{ кг/м}^3, \gamma_n = 2700 \text{ кг/м}^3, \gamma_z = 1500 \text{ кг/м}^3$ .

Максимальная предельная плотность газобетона  $\rho_m$  в объеме  $V_a$  вычисляется по формуле

$$\rho_m = \frac{\rho_k \cdot K_d \cdot l_e}{l_n}, \quad (6)$$

Сопоставляем  $\rho_y$  и  $\rho_m$ . Если  $\rho_y \geq \rho_m$ , следовательно, анкер проворачивается с потерей усилия вырыва. Если  $\rho_y < \rho_m$ , то вычисляется коэффициент  $K_p$

$$K_p = \frac{\rho_y}{\rho} \quad (7)$$

Усилие вырыва анкера  $N_a$  с заделкой в газобетон на глубину  $l_{ан}$  вычисляется по формулам:

– с использованием класса по прочности на сжатие В:

$$N_a = 0,37 \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_{вср} \cdot B \cdot n \cdot K_p \quad (8)$$

– с использованием значения кубиковой прочности R:

$$N_a = 0,26 \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_{вср} \cdot R \cdot n \cdot K_p. \quad (9)$$

### Примеры расчета усилий вырыва профилированных анкерных дюбелей из газобетона.

Фирмы Mungo, Fischer, Sormat, изготавливающие анкера для крепления конструкций к газобетонным стенам предлагают эти крепежные изделия в основном в виде анкерных дюбелей или анкеров-саморезов. Их конструкции примерно близки между собой.

Для примера расчета усилия выдергивания анкера рассмотрим анкер-дюбель, который был использован при экспериментальном определении усилий его выдергивания из автоклавного газобетона. Испытания проводились в лаборатории завода «Аэрок СПб». Испытывался пластмассовый анкер-дюбель Sormat КВТ6 (рис. 7) с распорным шурупом-саморезом 6x70.

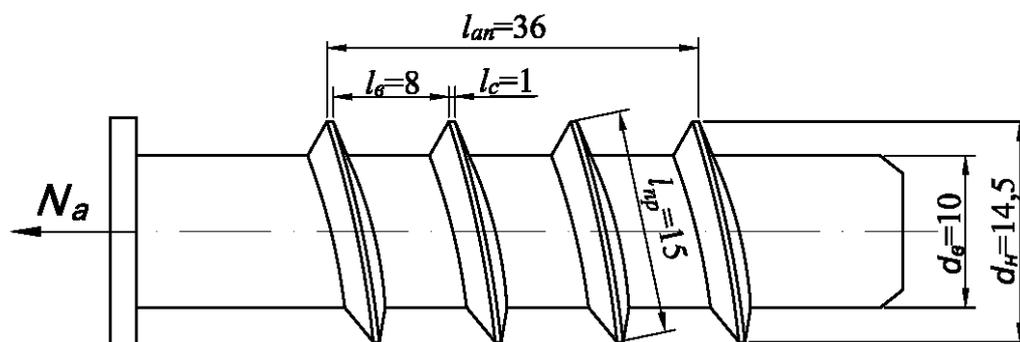


Рисунок 7 – Размеры анкера Sormat KBT6

Рассчитывается усилие вырыва канального анкера из газобетона марки D400, B2. Анкер имеет резьбу (профиль) со следующими геометрическими параметрами:

- наружный диаметр профиля  $d_n = 14,5$  мм;
- внутренний диаметр профиля  $d_e = 10$  мм;
- длина срезаемого газобетонного выступа  $l_{вср} = 8$  мм;
- длина профилированного участка анкера  $l_{ан} = 36$  мм;
- шаг профиля по наружному диаметру  $l_n = 9$  мм;

Расчет усилия вырыва анкера выполняется по изложенной выше методике. По формуле (2) вычисляем длину бетонного выступа (в сантиметрах), при которой он срезается

$$l_{ср}^{\max} = 1,63 d_n \cdot \left( 1 - \frac{d_e^2}{d_n^2} \right) = 1,63 \cdot 1,45 \cdot \left( 1 - \frac{1^2}{1,45^2} \right) = 1,24 \text{ см}$$

Так как  $l_e = 0,8 < l_{ср}^{\max} = 1,24$ , то газобетонный выступ срезается.  $l_{ср} = 0,8$  см.

Вычисляем число шагов профиля по формуле (3):

$$n = \frac{l_{an}}{l_g} = \frac{36}{9} = 4.$$

Определяем плотность уплотненного газобетона в объеме  $V_a$  по формуле (6). При установке анкера-дюбеля предварительно в газобетоне просверливался канал  $\varnothing 10$  мм и глубиной 48 мм. В канал вкручивался дюбель с наружной анкерующей резьбой  $d_n = 14,5$  мм. Так как  $d_n = d_g$ , коэффициент  $K_d = 1$ , а формула (4) принимает вид

$$\rho_y = \rho \cdot \frac{l_n}{l_g} = 400 \cdot \frac{9}{8} = 450 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность цементного камня газобетона рассчитывается по формуле (5). В данном расчете плотность принимаем  $\rho_k = 2850 \text{ кг/м}^3$ .

По формуле (6) вычисляется плотность  $\rho_m$

$$\rho_m = \frac{\rho_k \cdot K_d \cdot l_g}{l_n} = 2850 \cdot \frac{8 \cdot 1}{9} = 2533 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность газобетона  $\rho_y = 450 < \rho_m = 2533$ . Коэффициент  $K_p$  вычисляется по формуле (7):

$$K_p = \frac{450}{400} = 1,125.$$

Усилие вырыва анкера  $N_a$  вычисляем по формуле (8):

$$N_a = 0,37 \cdot 3,14 \cdot 1,45 \cdot 0,8 \cdot 20 \cdot 4 \cdot 1,125 = 121,3 \text{ кгс}$$

Полученное экспериментальным путем усилие вырыва  $N_{aэ}$  из газобетона классом прочности на сжатие В2,0 (кубиковая прочность  $R=2,95$  МПа)  $N_{aэ} = 113$  кгс.

Другой пример расчета усилия вырыва анкера-шурупа-самореза УК с неполной резьбой 6x70 мм (рис. 6) который также был использован при экспериментальном определении усилий его выдергивания из автоклавного газобетона в лаборатории завода «Аэрок СПб».

Рассчитывается усилие вырыва анкера из газобетона марки D500, В2,5. Определяются геометрические характеристики анкера и его профиля.

Анкер имеет резьбу (профиль) со следующими геометрическими параметрами:

- наружный диаметр профиля  $d_n = 0,58$  см;
- внутренний диаметр профиля  $d_g = 0,36$  см;
- расстояние между выступами профиля анкера (длина срезаемого газобетонного выступа)  $l_g = l_{np} = 0,25$  см;
- длина профилированного участка анкера  $l_{an} = 3,25$  см;

По формуле (2) вычисляем длину бетонного выступа (в сантиметрах), при которой он срезается

$$l_{г\text{ср}}^{\text{max}} = 1,63 d_n \cdot \left(1 - \frac{d_g^2}{d_n^2}\right) = 1,63 \cdot 0,58 \cdot \left(1 - \frac{0,36^2}{0,58^2}\right) = 0,58 \text{ см}$$

Так как  $l_g = 0,25 < l_{г\text{ср}}^{\text{max}} = 0,58$ , то газобетонный выступ срезается. Принимаем  $l_{г\text{ср}} = 0,25$  см.

Определяется число шагов профиля

$$n = \frac{3,25}{0,25} = 14$$

Вычисляется коэффициент  $K_d$

$$K_d = 1 - \frac{0,36^2}{0,58^2} = 0,615$$

Вычисляется  $\rho_y$  в объеме  $V_a$

$$\rho_y = \frac{500 \cdot 0,25}{0,25 \cdot 0,615} = 813 \text{ кг/м}^3$$

Вычисляется плотность камня из газобетона плотностью  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$  по формуле

$$\rho_k = \frac{\rho}{\frac{P_u}{\gamma_u} + \frac{P_u}{\gamma_u} + \frac{P_n}{\gamma_n} + \frac{P_{ш}}{\gamma_{ш}}}, \text{ кг/м}^3$$

где,  $P_u = 118 \text{ кг}$ ,  $P_u = 31 \text{ кг}$ ,  $P_n = 291 \text{ кг}$ ,  $P_{ш} = 93 \text{ кг}$  (шлам).

$\gamma_u = 3100 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_u = 3770 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_n = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_{ш} = 2900 \text{ кг/м}^3$ ,

$$\rho_k = \frac{500}{\frac{118}{3100} + \frac{31}{3770} + \frac{291}{2700} + \frac{93}{2900}} = 2850 \text{ кг/м}^3$$

Вычисляется плотность  $\rho_m$

$$\rho_m = \frac{2850 \cdot 0,615 \cdot 0,25}{0,25} = 1752 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_y = 813 < \rho_m = 1752$$

Вычисляется коэффициент  $K_\rho$

$$K_\rho = \frac{813}{500} = 1,62.$$

Усилие вырыва анкера рассчитывается по формуле (8)

$$N_a = 0,37 \cdot 3,14 \cdot 0,58 \cdot 0,25 \cdot 25 \cdot 14 \cdot 1,62 = 95,5 \text{ кгс.}$$

Полученное экспериментальное усилие вырыва  $N_{aэ}$  из газобетона классом прочности на сжатие В2,5 (кубиковая прочность на сжатие газобетона при влажности 10 % составляет  $R=3,21 \text{ МПа}$ ) равно  $N_{aэ} = 93,2 \text{ кгс}$ .

Полученные расчетным путем усилия вырыва анкеров из газобетона хорошо аппроксимируют результаты усилий полученных экспериментально.

## Литература

1. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов, М., 1986.
2. Решетов Д.Н., Кирсанова В.Н. Касательная контактная податливость деталей. – М.: Наука, Машиноведение, №2, 1970.
3. Карпенко Н.И., Судаков Г.Н., Лейтес Е.С., Золотов А.Б. Напряженно-деформированное состояние бетона в зоне контакта с арматурой до и после образования контактных трещин. – М.: НИИЖБ, 1979.
4. Шрейнер Л.А., Павлова Н.Н., Якушев В.П., Байдлюк Б.В. Применение метода вдавливания для установления сопротивляемости горных пород разрушению при бурении и качественной оценки пластичности горных пород. Сб. статей: Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных месторождений. – М.: Наука, 1964.
5. Холмянский М.М., Ерин Н.Н. Исследование механизма сцепления арматуры периодического профиля с бетоном при помощи испытаний бетона на местное смятие. – В кн.: Анкеровка арматуры в бетоне. – М.: Стройиздат, 1969.
6. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. – М.: Стройиздат, 1981.
7. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости. – М.: Госиздат, 1953.
8. Вылегжанин В.П. Определение деформаций элементов конструкций из сталефибробетона при растяжении и изгибе на различных стадиях загрузки. – Л.: ЛенЗНИИЭП, 1982, с. 53-60.