

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
автоклавнога газобетона

КРЕПЛЕНИЕ НАВЕСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ К ГАЗОБЕТОННЫМ СТЕНАМ

В настоящее время блоки из автоклавнога 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 надёжности их крепления с помощью анкеров к газобетонным стенам в зависимости от прочности, плотности газобетона.

С момента широкого применения изделий из автоклавнога газобетона испытывались различные виды анкерных креплений с целью определения усилий их выдёргивания. Однако никаких теоретических обоснований и формул для их расчёта предложено не было. Проведённые испытания показали, что прочность на срез (перпендикулярно оси анкера) как правило, больше, чем на вырыв (выдёргивание). Поэтому осевая прочность как слабое звено явилось предметом исследований, т. к. при использовании анкерных креплений для навесных фасадов последние подвергаются значительным усилиям от ветрового отсоса, доходя до 100 кгс/м², что и определяет необходимость разработки теоретических и практических аспектов прочности на вырыв анкеров из автоклавнога газобетона.

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

- Рост предельной величины усилия выдёргивания анкера близок к прямо пропорциональной зависимости от глубины его анкеровки.
- Предельное усилие выдёргивания 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, возникающие по длине заанкеренной части анкера при его выдёргивании, в рамках принятой модели численно равны силе сопротивления сдвигу, возникающей на единице площади контакта. Если предположить, что

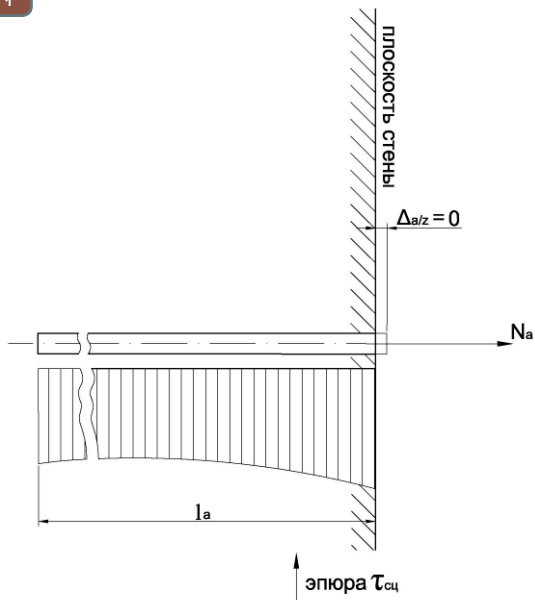
$$\tau_{cw} = \bar{\kappa} \cdot \bar{\Delta},$$

где $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}(z)$ — продольное смещение анкера в сечении с координатой z (рис. 1); $\bar{\kappa}$ — коэффициент жёсткости связей, препятствующих сдвигу, то, решив соответствующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \Delta_a}{dz^2} - \alpha^2 \Delta_a = 0,$$

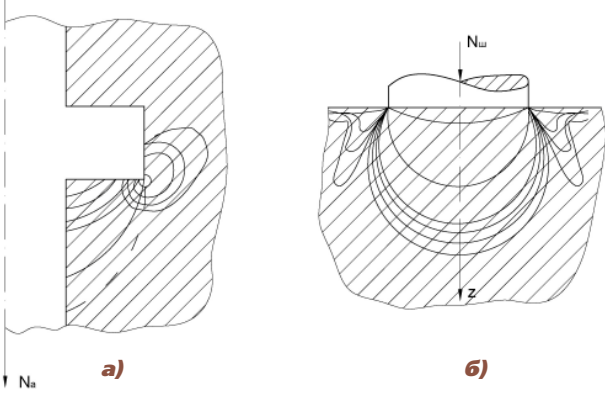


РИС. 1



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДЛИНЕ ЧАСТИ АНКЕРА В ГАЗОБЕТОНЕ ОТ ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ

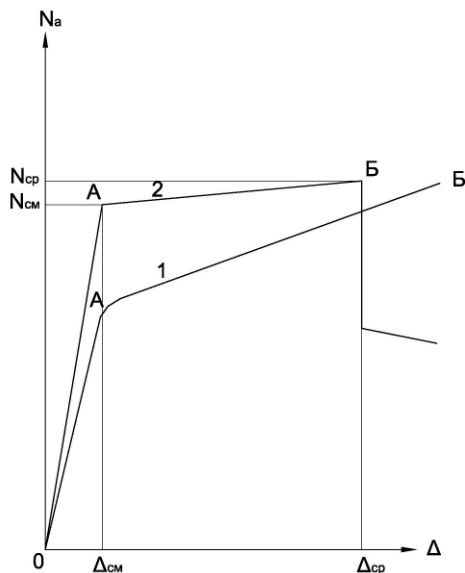
РИС. 2



ИЗОЛИНИИ ГЛАВНЫХ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИЕ:

а) в бетоне под выступом профиля анкера;
б) в хрупком материале под жёстким плоским цилиндрическим штампом

РИС. 3



ЗАВИСИМОСТИ СМЕЩЕНИЙ ОТ УСИЛИЙ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ШТАМПА (КРИВАЯ 1), ВЫДЁРГИВАНИИ АНКЕРА (КРИВАЯ 2)

где $\alpha = \sqrt{\frac{4\kappa}{E_a \cdot d}}$, E_a – модуль упругости материала анкера;

d – диаметр анкера; согласно работе [8]:

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

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.

В настоящей статье рассматриваются только профилированные каналные анкеры, которые устанавливаются в предварительно высверленный канал. Прочность их сцепления с газобетоном выше, чем у анкеров с гладкой поверхностью. Такой характер распределения касательных напряжений позволяет принять, что при расчёте усилий выдёргивания 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 её поверхности.

Анкеры или их дюбели заделываются в газобетон в предварительно просверлённый канал (форканал) диаметром равным d_n – внутреннему диаметру профиля анкера, дюбеля (рис. 4).

Величина усилия выдёргивания определяется сопротивлением газобетонных выступов, расположенных по всей его заделке в газобетон, разрушению, которое характеризуется их смятием или срезом. Характер разрушения выступа зависит от его размеров: длины выступа l_B и высоты, равной $d_n - d_s/2$, где d_n, d_s – наружный и внутренний диаметр профиля, соответственно (рис. 4). Длина выступа $l_B = l_{в.ср}$, при которой происходит его срез, определяется из равенства усилия $N_{см} = N_{ср}$, где $N_{см}, N_{ср}$ – усилия, воспринимаемые газобетоном при смятии или срезе, соответственно.

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 зависимости между усилиями и смещениями (рис. 3) при вдавливании штампа [4], вытягивании анкера [5].

Известно, что напряжённое 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 расчётах последние.

С увеличением усилий выдёргивания зона пластически деформируемого бетона под штампом увеличивается

и в итоге приобретает форму криволинейного сегмента (рис. 4), прилегающего к поверхности полусферы диаметром $d_c \approx d_{ш}$ — диаметру штампа, с высотой примерно равной $d_{ш}$ [3].

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-A). 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 счёт 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 выдёргивании анкера (рис. 2) следует, что газобетон под выступами его профиля тоже пластически деформируется при некотором значении усилия $N_a = N_{см}$. Объём пластически деформируемого газобетона в процессе вытягивания анкера формируется в виде части вытянутого сегмента эллипсоида, высота которого, исходя из работы [12], [14], может быть принята примерно равной высоте профиля (рис. 4). За счёт уплотнения сминаемого газобетона происходит смещение выступа профиля анкера. На кривой $N_a - \Delta$ (рис. 3) этот момент соответствует её излому в точке А.

Как показали исследования [5], напряжение $R_{см}$, соответствующее смятию газобетона под выступом профиля анкера, находится в прямопропорциональной зависимости от его кубиковой прочности на сжатие R .

$$R_{см} = K_{см} \cdot R, (2)$$

где $K_{см} = 1,7$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий сопротивление газобетона смятию. Коэффициент $K_{см}$ получен при приведении к кубиковой прочности расчётного сопротивления смятия газобетона $R_{в.loc} = 1,2R_s$, где R_s — расчётное сопротивление газобетона сжатию [1].

При известной высоте выступа профиля анкера равной $d_n - d_s$, где d_n, d_s — максимальный и минимальный диаметр профилированного анкера (рис. 5), и величины $R_{см}$ определяется усилие смятия $N_{см}$ газобетона под этими выступом по формулам:

$$N_{см} = 0,25\pi(d_n^2 - d_s^2) \cdot R_{см}, (3)$$

$$N_{см} = 0,425\pi(d_n^2 - d_s^2) \cdot R, (4)$$

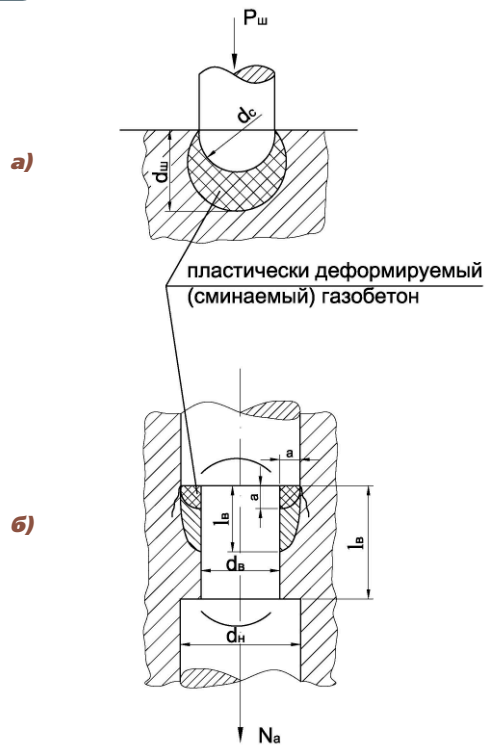
Формула (4) применима для анкера с прямоугольным профилем перпендикулярным к его оси. Если профиль наклонён относительно перпендикулярного профиля на угол α_1 (рис. 5), то $N_{см}$ умножается на величину $1/\cos\alpha_1$.

$$\text{Величина } \cos\alpha_1 = \frac{d_n}{l_{np}},$$

где l_{np} — длина наклонённого выступа профиля анкера относительно его оси (рис. 5).

Предельное усилие сопротивления газобетонного выступа может определяться, кроме смятия газобетона, его срезом $N_{ср}$. Усилие среза выступа вычисляется по формуле

РИС. 4



■ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА:

а) под цилиндрическим штампом при его вдавливании;

б) под выступами профиля анкера при её вытягивании ■

$$N_{ср} = \pi \cdot d_n \cdot l_{в.ср} \cdot R_{ср}, (5)$$

где $l_{в.ср}$ — длина срезаемого газобетонного выступа; $R_{ср}$ — сопротивление газобетона срезу.

Согласно работе [1], расчётное сопротивление газобетона срезу $R_{ср} = 2,0R_{bt}$, где R_{bt} — расчётное сопротивление газобетона растяжению. Приведя $R_{ср}$ и R_{bt} к средней кубиковой прочности газобетона на сжатие R или к его классу прочности на сжатие В, получим:

$$R_{ср} = 0,26R = 0,37B (6)$$

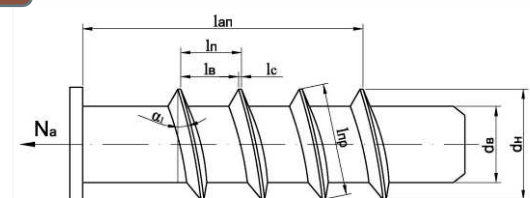
Формула (5) для вычисления усилия среза выступа примет вид:

$$N_{ср} = 0,26\pi \cdot d_n \cdot l_{в.ср} \cdot R = 0,37\pi \cdot d_n \cdot l_{в.ср} \cdot B (7)$$

Максимальная длина бетонного выступа $l_{в.ср}^{max}$, при которой происходит его срез, определяется из равенства $N_{ср} = N_{см}$ (1). Подставив в это равенство (4) и (7), получим:

$$l_{в.ср}^{max} = \frac{1,63d_n}{\cos\alpha_1} \cdot \left(1 - \frac{d_s^2}{d_n^2}\right) (8)$$

РИС. 5



■ ХАРАКТЕРНЫЕ РАЗМЕРЫ ПРОФИЛЯ АНКЕРА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАСЧЁТЕ УСИЛИЙ ЕГО ВЫДЁРГИВАНИЯ ■

ВЫЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ВЫДЕРГИВАНИЯ АНКЕРА-ДЮБЕЛЯ SORMAT KBT6

Марка газобетона по средней плотности	Влажность газобетона, %	Кубиковая прочность на сжатие, R, МПа	Усилие выдёргивания анкера Na		Отклонение вычисленных усилий от экспериментальных, %
			вычисленное, кгс	экспериментальное, кгс	
D300	5	2,01	76,1	74,3	2,4
	10	1,84	69,0	67,4	2,0
	25	1,74	65,7	64,3	1,3
	87	1,49	56,1	61,1	8
D400	5	2,95	111,2	113	1,6
	10	2,81	105,4	107	1,5
	71	2,19	82,6	99,2	16,7
D500	5	3,54	133	140	4,7
	10	3,21	121	142	14,8
	38	2,78	104	123	15,0
	67	2,47	100	106	5,6
D600	5	6,45	243	246	1,2
	25	5,27	198	237	16,3
	38	5,23	197	214	7,8
	63	5,28	198	199	0,5

При $l_s \leq l_{ср}^{max}$, где l_s — длина срезаемого газобетонного выступа, газобетон срезается без его смятия, $l_{ср} = l_s$; а при $l_s > l_{ср}^{max}$, газобетон под выступом профиля вначале сминается $l_{ср} = l_{ср}^{max}$. Смятие газобетона сопровождается ростом необратимых смещений анкера относительно массива газобетона. Эти смещения будут возрастать, пока оставшаяся часть несмятого газобетонного выступа не достигнет значения $l_{ср}^{max}$, после чего произойдет срез на несмятой части выступа. Усилие среза газобетонного выступа, вычисляемого по (5), и будет определять максимальную величину усилия, воспринимаемого газобетонным выступом, образуемым профилем анкера.

Усилие N_a , воспринимаемое заделанной в газобетон частью анкера l_a , вычисляется по формуле:

$$N_a = N_{ср} \frac{l_{ан}}{l_n} = 0,26\pi \cdot d_n \cdot l_{ср} \cdot R \cdot n, \quad (9)$$

или в зависимости от B:

$$N_a = 0,37\pi \cdot d_n \cdot l_{ср} \cdot B \cdot n \quad (10)$$

где $l_n = l_s + l_c$ — шаг профиля анкера;
 $l_{ан}$ — длина профилированного участка анкера в газобетоне;

l_c — длина выступа профиля анкера (рис. 5);

$n = \frac{l_{ан}}{(l_s + l_c)}$ — количество выступов профиля анкера заделанных в газобетоне.

Расчётное усилие $N_{ат}$ воспринимаемое этим анкером определяется по формуле:

$$N_{ат} = 2,0\pi \cdot d_n \cdot l_{ср} \cdot R_{бр} \cdot n, \quad (11)$$

или $N_{ат} = 0,08\pi \cdot d_n \cdot l_{ср} \cdot R \cdot n$,
или $N_{ат} = 0,113 \cdot d_n \cdot l_{ср} \cdot B \cdot n$.

Из приведённых формул расчёта усилий выдёргивания анкера следует, что величина усилий находится в прямопропорциональной зависимости от прочности газобетона при сжатии.

Экспериментальное определение усилий выдёргивания анкер-дюбеля из автоклавного газобетона проводилось в лаборатории завода «Аэрок СПб». Испытывался пластмассовый анкер-дюбель Sormat KBT6 (рис. 5) с распорным шурупом-саморезом 6 × 70.

Дюбель имеет резьбу (профиль) со следующими геометрическими параметрами (рис. 5): $d_n = 14,5$ мм; $d_s = 10$ мм; $l_s = 8$ мм; $l_{ан} = 36$ мм; $l_c = 1$ мм; $l_{np} = 15$ мм; $n = 4$; $\cos \alpha_1 = 0,967$.

При установке анкера-дюбеля предварительно в газобетоне высверливалось отверстие (канал) Ø 9 мм и глубиной 48 мм. В канал вкручивался дюбель с наружной анкерующей резьбой $d_n = 14,5$ мм. В дюбель вкручивался шуруп-саморез.

В таблице приведены результаты расчётов усилий выдёргивания анкера Sormat KBT6 и экспериментальные данные, полученные при различной влажности газобетона. Как видно из таблицы, предложенная расчётная зависимость прочности анкера на выдёргивание хорошо аппроксимирует экспериментальные данные и может быть использована при проектировании. Необходимо учесть, что расчётные формулы (11) дают коэффициент запаса 3,27, по зарубежным данным этот коэффициент равен 3. ●

• ИСТОЧНИКИ •

- [1] ГОСТ Р 53231–2008 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
- [2] Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов. — М., 1986.
- [3] Решетов Д. Н., Кирсанова В. Н. Касательная контактная податливость деталей. — Наука. Машиноведение. — 1970. — № 2.
- [4] 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., 1979.
- [5] 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., 1964.
- [6] 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., 1969.
- [7] Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном. — М., 1981.
- [8] Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости. — М., 1953.
- [9] Вылегжанин В. П. Определение деформаций элементов конструкций из сталефибробетона при растяжении и изгибе на различных стадиях загрузки // Пространственные конструкции в гражданском строительстве. — Л., 1982. — С. 53–60.