

2. ВНЕШНИЕ СИЛЫ

2.1. Нагрузки¹ рабочего и предельного состояния

Не имея возможности в течение многих столетий «заглянуть внутрь материала», строители, в том числе и теоретики прочности, создавали для себя набор сооружений и их элементов по предельным воздействиям, которые они могут выдержать. Так, опыты Леонардо да Винчи, Галилео Галилея, Ивана Петровича Кулибина и многих других проводились с отдельными элементами сооружений - балками, колоннами, стержнями с целью определения той предельной тяжести, которую может выдержать элемент. Леонардо да Винчи рекомендовал, например, «провести серию опытов, начиная с балки, способной нести определенную нагрузку, а затем, переходя последовательно к более длинным балкам той же высоты и ширины, отмечать всякий раз величину нагрузки, которую они выдерживают». В результате испытаний балок - консолей он приходит к выводу: «Если балка в два локтя длиной выдерживает сто фунтов, то балка длиной один локоть будет выдерживать двести фунтов».

Такие испытания и главным образом практический опыт вылились в рекомендации по назначению пролетов, размеров сечений элементов, выполненных из камня, дерева, металла. Таким образом, постепенно создавался банк предельных характеристик по внешним воздействиям, основным из которых является сила тяжести самих конструкций и их наполнения людьми, жидкостями, сыпучим телом, оборудованием, связанным с функциональным назначением зданий. В неявном виде банк предельных характеристик по внешним воздействиям содержался в известных трактатах по строительству и архитектуре Витрувия, Альберти и других. Элементу сооружения с определенными размерами, выполненному из определенного материала, ставилась в соответствие сила тяжести, которую он может выдержать. Это есть не что иное, как банк предельных характеристик по нагрузке в современном его понимании.

Традиции по использованию такого банка сохраняются и в настоящее время, но их составление основывается и на положениях теории сооружений. Для получения интенсивности воздействий в рабочем состоянии наиболее употребителен расчетный путь, альтернативы ему очень слабы или весьма трудоемки. При построении методик расчета должна быть создана (принята) теоретическая модель - представление о воздействиях. Ее помогает составить концепция сил, рассмотренная в предыдущей главе: напомним, что она построена на

¹ Нагружать - создать грудю чего-либо (грудя - общеславянское слово, первоначальное значение - разбитое, размолотое).

принципах взаимосвязанности сооружения и окружающей среды. В соответствии с концепцией сил мы должны выделить сооружение, удалить внешние по отношению к нему связи и заменить их силами. Ту часть пространства, которая при этом удаляется, т. е. все, кроме самого сооружения или его элемента, называют средой. К среде будем относить и собственный вес сооружения. После удаления среды мы получаем сооружение в пустоте, к которому приложены силы в отброшенных связях между средой и сооружением. Такие силы носят название нагрузки.

Кроме упомянутой тяжести или гравитационной среды на сооружение воздействуют другие среды. Динамическая среда - от действия машин, механизмов, сейсмических движений. Температурная, усадочная среды. Среды со специфическими физико-механическими свойствами вязкости, ползучести, пластичности (ледовая, жидкая, газообразная, сыпучая и другие).

Нагрузки рабочего состояния - это максимальные из всех нагрузок, соответствующих возможным воздействиям среды. Обычно они подсчитываются суммированием максимально возможных нагрузок от каждого воздействия в отдельности. Нагрузка зависит от состояния конкретной среды и характеристик сооружения, изменяющихся при ее действии. В настоящей главе мы разберем такие нагрузки, которые не вызывают значительного изменения формы и размеров самого сооружения и поэтому от его характеристик не зависят. Форма и размеры сооружения принимаются в начальном заданном проектном положении. Ввиду этого величина нагрузки определяется только состоянием среды. Так как внешние связи за прочность сооружения «не отвечают», во многих случаях можно допустить их разрушение, при этом в связях, соединяющих среду с сооружением, возникают максимальные усилия. Можно, например, представить себе такой опыт: к концу стержня привязать тонкую нить и потянуть за нее. Очевидно, что наибольшее усилие стержню будет передаваться перед разрывом нити.

Нагрузка рабочего состояния необходима не только для оценки прочности по ней. Она является начальным этапом по определению усилий, напряжений, перемещений и других характеристик сооружений (см. рис.1.2).

Если нагрузка не является собственным весом сооружения или инерцией, то она передается через поверхность контакта среды и сооружения. Такую нагрузку называют *поверхностной* (распределенной по поверхности). Мы разберем такие поверхностные нагрузки, как давление *однородной и слоистой гравитационной среды* на горизонтальную поверхность - *гравитационную нагрузку*. Давление несвязной среды на ограждения (давление сыпучих тел,

гидростатическое давление) - *боковую нагрузку*. Давление *движущихся сред* (воды, воздуха) - *аэрогидродинамическую нагрузку*.

2.2. Гравитационная нагрузка

Гравитационная нагрузка - самый распространенный вид нагрузки. Она обусловлена силой тяжести и определяется весом самих несущих и ограждающих конструкций, весом оборудования, людей, складироваемых материалов и других объектов. Для большинства сооружений эта нагрузка является определяющей.

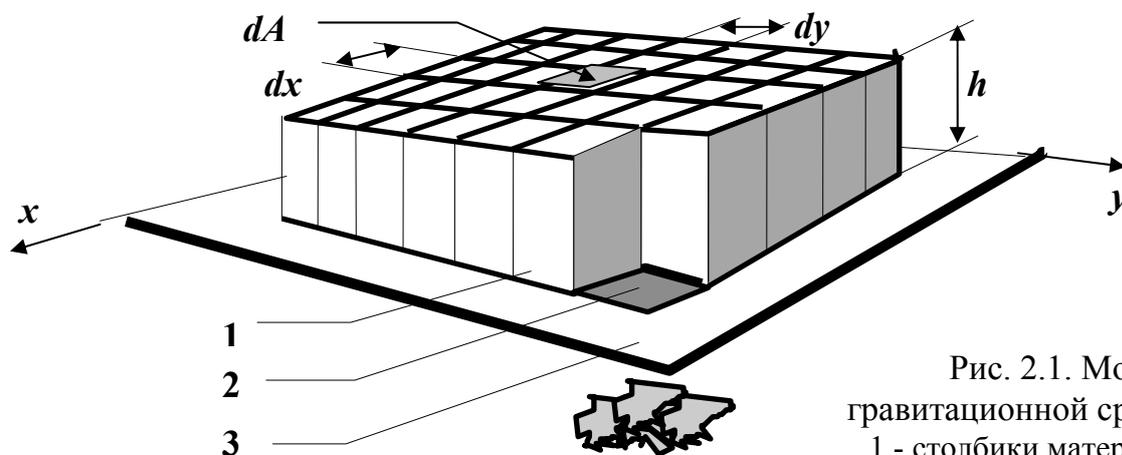


Рис. 2.1. Модель гравитационной среды:
1 - столбики материала,
2 - отверстие в горизонтальной поверхности,
3 - горизонтальная поверхность

Анализ возможного разрушения сооружений или отдельных его элементов дал возможность построить представление о предельном состоянии гравитационной среды. Если, например, уложить слой кирпичей на плиту перекрытия без перевязки швов (столбиками) (рис.2.1) и удалить часть плиты под столбиком, то столбик лишится опоры и упадет, т. е. каждый столбик в отдельности передает свое давление плите только в определенном месте. Мысленно можно представить, что с уменьшением размеров кирпичиков давление от каждого столбика в пределе будет передаваться в точку. Причем это давление будет наибольшим. Если же столбики связать между собой по горизонтали перевязкой и проделать ту же операцию по удалению части плиты под столбиком, то он упадет не весь, то есть давление уменьшится. Следовательно, объективно складывается представление о разрушении гравитационной среды, дающей максимальное давление. Она представляется как *совокупность бесконечно малых в поперечном сечении столбиков, не связанных между собой по горизонтали*

(свободно перемещающихся друг относительно друга). Существуют только вертикальные (вернее, по направлению силы тяжести) связи, усилия в которых также вертикальные. Для наглядности разрушенная гравитационная среда часто представляется сыпучим несвязным и без внутреннего трения веществом - сухим окатанным песком, зерном, дробью и другими подобными средами, которые наделяются способностью сохранять форму объекта, создающего гравитационную нагрузку. Но лучше ее представлять системой кирпичных столбиков, уложенных без перевязки.

Однородная среда. Если материал имеет одинаковую плотность во всем объеме, то его называют однородным. В однородной среде по известному объему материала в конструкции (в оборудовании, объему складываемых материалов и других объектов) - V и, приходящемуся на единицу объема, весу материала - *удельному весу* - γ можно определить ее полный вес - G

$$G = \gamma \cdot V. \quad (2.1)$$

Удельные веса некоторых часто встречающихся в строительной практике материалов приведены в таблице 2.1.

Если однородный материал равномерным слоем (слоем одинаковой высоты h) покрывает некоторую поверхность площадью A , то его объем равен $V = h \cdot A$,

а вес $G = h \cdot A \cdot \gamma$

Частное от деления веса G на площадь A представляет собой величину

$$q = G/A = \gamma \cdot h \cdot A/A = \gamma \cdot h, \quad (2.2)$$

которая характеризует интенсивность поверхностной нагрузки (вес, приходящийся на единицу площади).

Зависимость (2.2) не изменится и тогда, когда высота слоя не одинакова по поверхности. При этом необходимо рассматривать малый участок площади dA и малый объем $dV = h \cdot dA$. Давление распределяется так же, как высота слоя

$$q = \gamma dV / dA = \gamma \cdot h.$$

Пример 2.1. Определить давление инертного заполнителя бетона (гравия) на пол банки склада размером в плане 4×4 м. Заполнитель поступает через бункер в центре перекрытия банки. Высота от пола до низа бункера равна трем метрам.

Таблица 2.1

Средние удельные веса распространенных строительных материалов (γ , кН/м³)

Материал	γ	Материал	γ
Гранит	26	Минеральная вата	4
Известняк обыкновенный	21	Пенопласт	2
Кирпич глиняный	18	Сталь Ст.3	78,5
Кирпич диатомовый	7	Чугун серый	71
Кирпич силикатный	19	Медь	89
Бетон обычный	22	Алюминиевые сплавы	26
Железобетон	25	Органическое стекло	14
Шлакобетон	14	Стекло	23,5
Керамическая плитка	22	Стеклотекстолит	18,5
Оргалит твердый	6	Капрон	11,5
Рубероид толщиной 3мм	10	Линолеум толщиной 5мм	18
Дуб	8	Керамзит - утеплитель	8
Сосна	5	Керамзит конструкционный.	12

Примечание. Удельные веса сыпучих тел (грунтов) см. таблицу 2.5

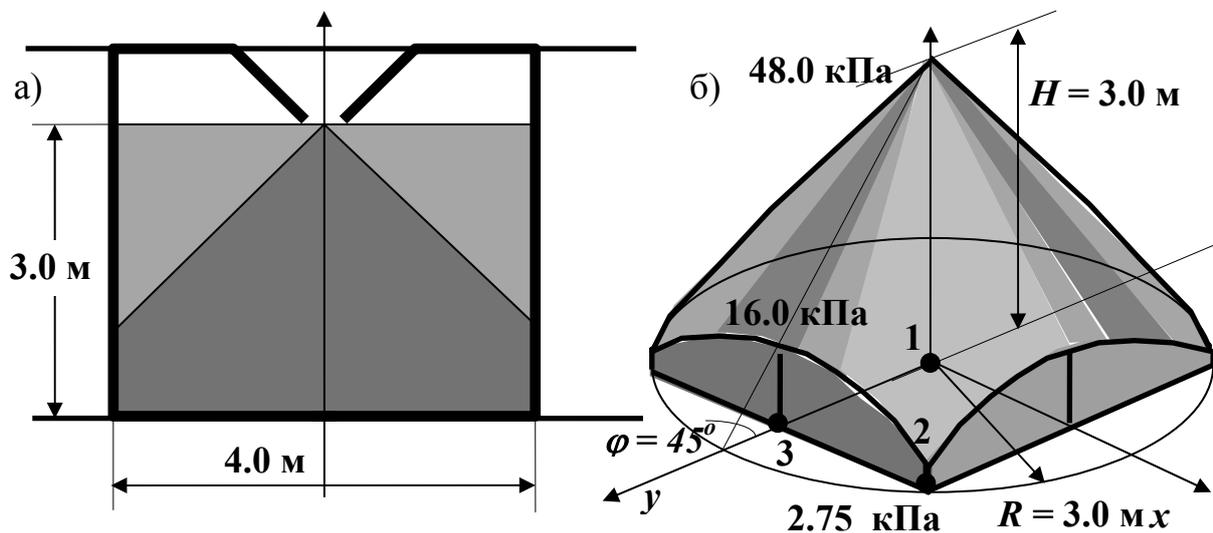


Рис.2.3. Банка склада инертных материалов
а - разрез банки, б - Форма насыпи в ней

Решение. Наибольшее давление на пол будет в том случае, когда банка будет загружена полностью равномерным слоем высотой 3 м. При удельном весе сухого гравия $\gamma = 16 \text{ кН/м}^3$ (см. табл. 2.5) будем иметь интенсивность давления

$$q = 16 \cdot 3 = 48 \text{ кН/м}^2.$$

*Замечание*². Однако, реализовать такое давление по всей площади при одном бункере в середине банки очень трудно без дополнительных работ по разравниванию гравия. При заполнении банки через бункер, вероятнее всего, будет образован конус с вершиной в уровне низа бункера, т. е. высотой три метра. Чтобы ответить на вопрос о том, как изменится давление на пол банки, если учесть наиболее вероятное ее заполнение через центральный бункер, мы должны получить закон распределения высоты слоя по площади пола, который совпадает с уравнением поверхности конуса в координатах x, y, z (см. рис. 2.2). Угол естественного откоса гравия по таблице.2.5 равен 45° . Поэтому радиус основания конуса должен быть равен его высоте, то есть $R = 3$ м. Но полностью такой конус в банку не помещается. Поэтому он будет не полным (см. рис. 2.2). Уравнение поверхности конуса³

$$h = z = H (1 - \sqrt{x^2 + y^2} / R),$$

или с учетом того, что $H = R = 3$ м

$$h = 3 - \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Давление на пол определим в характерных точках по формуле (2.2):

точка 1 ($x = 0, y = 0$) $q = 16 \cdot 3 = 48$ кН/м,

точка 2 ($x = 2, y = 2$) $q = 16 \cdot (3 - \sqrt{2^2 + 2^2}) = 2,75$ кН/м,

точка 3 ($x = 2, y = 0$) $q = 16 \cdot (3 - \sqrt{2^2 + 0^2}) = 16$ кН/м.

Таким образом, пол банки будет загружен неравномерно. В углах давление приближается к нулю, в середине каждой стороны оно в три раза меньше, чем от равномерно распределенного слоя. Банка заполняется всего на половину своего объема. Чтобы использовать более полно объем банки, в ее перекрытии можно установить большее количество бункеров (например, четыре) или загрузить материалом с меньшим углом внутреннего трения (например, углом внутреннего трения 25°). Определить величины давления и оценить неравномерность загрузки банки в этих случаях читатель может самостоятельно.

² Если дальнейшие рассуждения читатель посчитает слишком сложными, он может без ущерба для понимания их пропустить.

³ Семендяев К.А., Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - М.: Наука, 1980.

Собственный вес конструкции также можно отнести к однородной гравитационной среде. Усредненная поверхностная нагрузка может быть определена делением собственного веса изделия на горизонтальную проекцию его поверхности

$$q = G/A. \quad (2.3)$$

Эта усредненная поверхностная нагрузка может использоваться в качестве нагрузки рабочего состояния тем точнее, чем меньше изменение высоты изделия по площади за счет ребер, отверстий и других возмущений.

Пример 2.2. Определить среднюю интенсивность поверхностной нагрузки от плиты покрытия, выполненной из тяжелого железобетона и имеющей размер в плане 3×6 м. Объем плиты 1.15 м³ (рис.2.3).

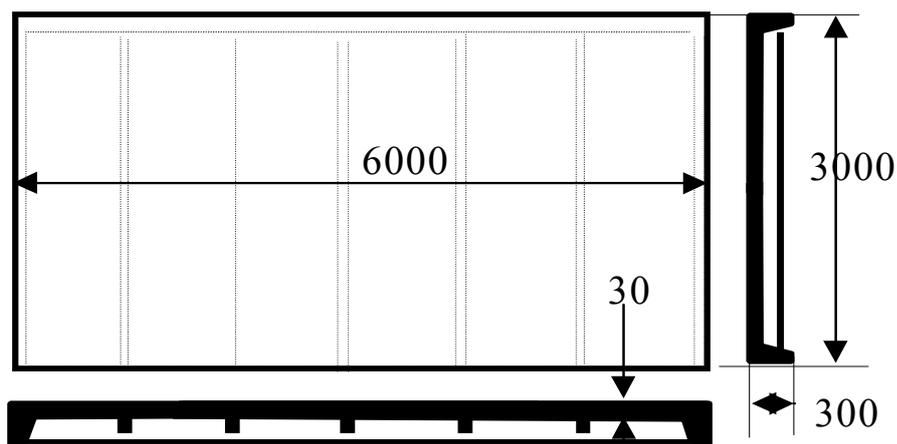


Рис. 2.3. Плита покрытия

Решение. Удельный вес тяжелого железобетона 25 кН/м³. Вес плиты $G = V \cdot \gamma = 1.15 \cdot 25 = 28.75$ кН. Усредненная нагрузка от плиты

$$q = G/A = 28.75 / (3 \cdot 6) = 1.597 \text{ кН/м}^2.$$

Пример 2.3 (для самостоятельного решения). Плита покрытия ТТ (два ТЭ) имеет размеры в плане 3×18 м. Определить среднюю нагрузку от собственного веса плиты, если она выполнена из конструкционного керамзита. Объем плиты 3.56 м (рис.2.4).

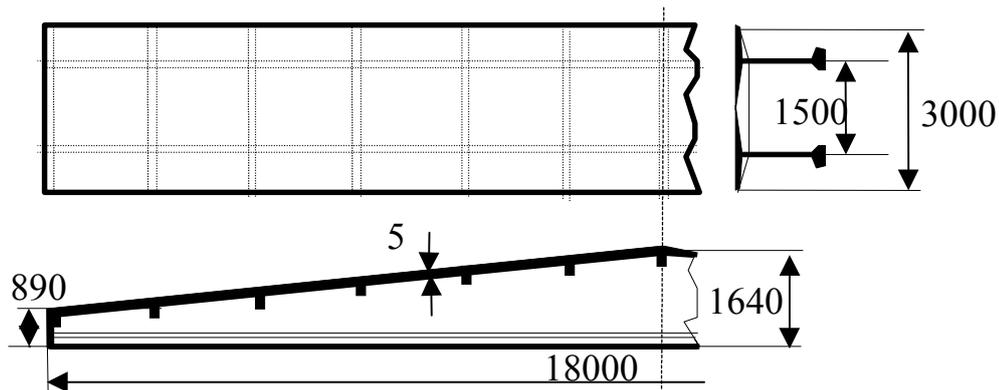


Рис. 2.4. Плита типа ТТ (два ТЭ)

Слоистая среда образуется напластованием материалов, отличающихся плотностью и, следовательно, удельным весом γ . Формула (2.2) в чистом виде применяется только к одному слою. Давление же всех слоев равно сумме давлений каждого из них, то есть

$$q = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \gamma_i, \quad (2.4)$$

где n - количество слоев.

Иногда слоистая среда приводится к однородной среде. Операция приведения напластования к однородному слою заключается в том, что один из них выбирается за основу для приведения ($\gamma_{эkv}$), а затем из условия равенства давлений $h_i \cdot \gamma_i = h_{эkv} \cdot \gamma_{эkv}$ определяется высота эквивалентного слоя

$$h_{iэkv} = h_i \cdot \gamma_i / \gamma_{эkv}. \quad (2.5)$$

Высота однородного слоя определяется как сумма эквивалентных слоев.

Пример 2.4. Определить давление на перекрытие от пола и несущей плиты. Пол выполнен из дубового паркета. Толщина его 2 см. Паркет укладывается по черному полу из сосны (толщина 5 см). Черный пол устроен по лагам 5×8 см с шагом 60 см. Лаги утоплены в звукоизоляционный шлакобетонный слой толщиной 8 см. Железобетонная несущая плита имеет высоту 12 см.

Решение. Слоистое перекрытие имеет различные по высоте удельные веса материалов. Для определения нагрузки от каждого слоя будем использовать зависимость (2.2), а затем полученные значения просуммируем (табл.2.2).

Таблица 2.2
Нагрузка от перекрытия

Состав перекрытия	Толщина, см	Удельный вес, кН/м ³	Вес слоя, кН/м ²
Пол паркетный	2	8	0,16
Черный пол	5	5	0,25
Слой шлакобетона с втопленными лагами	8	13.25	1.06
Плита перекрытия	12	25	3.0
Итого			4,47

Слой шлакобетона с утопленными в него лагами заменим однородным слоем материала толщиной 8 см. Определим усредненный удельный вес. Для этого рассмотрим полоску вдоль лаг шириной равной расстоянию между лагами - 60 см (0.6 м) и длиной один метр. Объем лаги составляет $0.05 \cdot 0.08 \cdot 1 = 0.004$ м³, удельный вес (сосна) 5 кН/м³. Объем шлакобетона составляет $0.08 \cdot (0.6 - 0.05) = 0.044$ м³ с удельным весом 14 кН/м³. Средний удельный вес вычислим как частное от деления суммарного веса лаги и шлакобетона на их суммарный объем

$$(0.004 \cdot 5 + 0.044 \cdot 14) / (0.004 + 0.044) = 13.25 \text{ кН/м}^3.$$

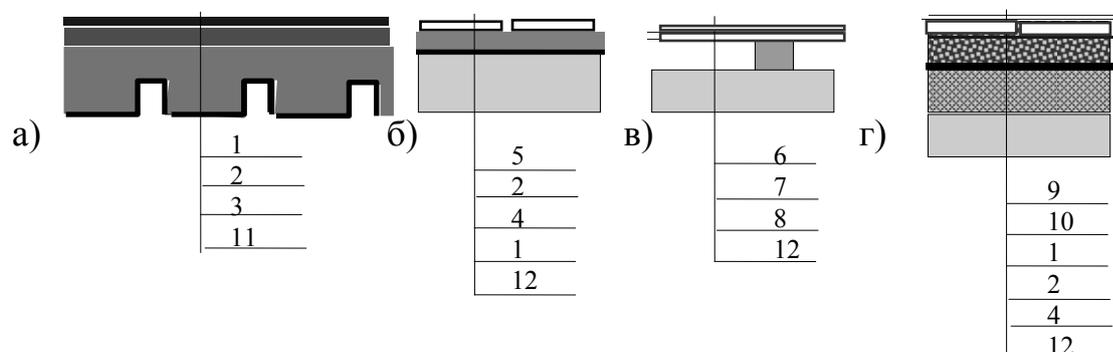


Рис. 2.5. Слоистые среды

а - перекрытие по профилированному настилу,

б, в - перекрытие в ванной и жилой комнате,

г - покрытие с эксплуатируемой кровлей.

1 - гидроизоляционный ковер (4 слоя рубероида), 2 - цементная стяжка (3 см),
3 - минераловатные плиты (8 см), 4 - утеплитель (керамзит - 20 см), 5 - керамическая плитка (0.6 см), 6 - линолеум, 7 - оргалит (0.6 см), 8 - чистый пол (сосна, 4 см) по лагам (сосна 6x8 см, шаг 60 см), 9 - бетонные тротуарные плиты (8 см), 10 - гравийный дренажный слой (15 см), 11 - стальной профилированный настил (0.12 см), 12 - железобетонная плита (12 см)

Пример 2.5 (для самостоятельного решения). Определить нагрузку от слоистых покрытий и перекрытий, представленных на рисунке 2.5.

Чрезвычайно неоднородной гравитационной средой является та, для которой предназначено само сооружение. Это люди, оборудование и технологические процессы. Нагрузку от такой среды называют **полезной нагрузкой**.

Ее очень трудно найти из более менее простых предположений. Затруднения в определении полезной нагрузки не в построении модели ее разрушения, которая остается той же (все объекты «превращаются в сыпучее тело»), а в определении вероятности совпадения многих явлений в одном. Полезной нагрузкой в жилом доме, например, являются жильцы, мебель, аппараты и приборы бытового обслуживания и другое.

Таблица 2.3

Полезная нагрузка на плиты перекрытий, лестницы и полы

Здания и помещения	Значения нагрузки, кПа	Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f
1. Чердачные помещения	0.70	1.3
2. Жилые и дошкольные учреждения, гостиницы, больницы	1.50	1.3
3. Служебные помещения, кабинеты, аудитории, лаборатории, читальные залы, помещения для мелкого скота	2.00	1.2
4. Обеденные залы, вестибюли гостиниц, больниц, учебных заведений	3.00	1.2
5. Залы собраний, ожиданий, зрелищные помещения, трибуны с сидениями, балконы	4.00	1.2
6. Книгохранилища, архивы, трибуны для стоячих зрителей, вестибюли залов, сцены, помещения для крупного скота	5.00	1.2

Нужно решить, как может быть установлена мебель, сколько человек в доме одновременно может находиться, как располагаются

группы людей, что они делают. Нетрудно догадаться о сложности решения задачи, учитывая разнообразие жизни людей, их вкусов и привязанностей. На помощь здесь приходят опыт и воображение расчетчика. Он должен представить себе наиболее неблагоприятное расположение объектов, даже такое, которое трудно реализовать в жизни. Опыт этот обобщен и закреплён в нормативных документах (см. выборку из СНиП 2.01.07.-85, помещённую в таблице 2.3). Полезная нагрузка принимается равномерно - распределённой по поверхности.

Снеговая нагрузка - от веса снегового покрова - относится к особому климатическому типу гравитационной нагрузки. Она обусловлена климатическими особенностями района строительства. В экваториальной части земли она не существует, а по мере приближения к полюсам увеличивается. На толщину снегового покрова в заданной местности влияют многие климатические и географические факторы (ветер, морские течения - теплые и холодные, горы, леса и другие).

Поэтому в районе строительства зимой необходимо изучить толщину и удельный вес (плотность) снегового покрова. Ввиду большого разброса удельного веса снега (его плотности сложения) не достаточно знать только толщину снежного покрова. Чтобы упростить методику определения снеговой нагрузки, за нормативное значение веса снегового покрова s_0 принимается среднее значение наблюдаемых в течение 10 лет ежегодных максимумов слоя воды ($\gamma = 10 \text{ кН/м}^3$), полученного из снега, взятого на защищенном участке местности.

Толщина слоя воды и соответствующее ему давление снегового покрова по районам Дальнего Востока России (см. рис.2.6, полная карта помещена в приложении к СНиП 2.01.07-85) приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4
Среднемноголетние максимумы запаса воды в снеге
и давления снегового покрова по климатическим районам

Параметры	Районы					
	I	II	III	IV	V	VI
1. Среднемноголетние значения ежегодных максимальных запасов воды на защищенном участке местности, мм	50	70	100	150	200	250
2. Давление снегового покрова s_0 , кПа	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5

Если снег падает (оседает) на покрытие, то в зависимости от очертания кровли могут образовываться наносы, а на покрытиях с уклоном свыше 60° он не удерживается вовсе. Удержанию снега способствуют фонари, парапеты, ветрозащитные щиты и другие препятствия. Поэтому для получения наименьшего загромождения

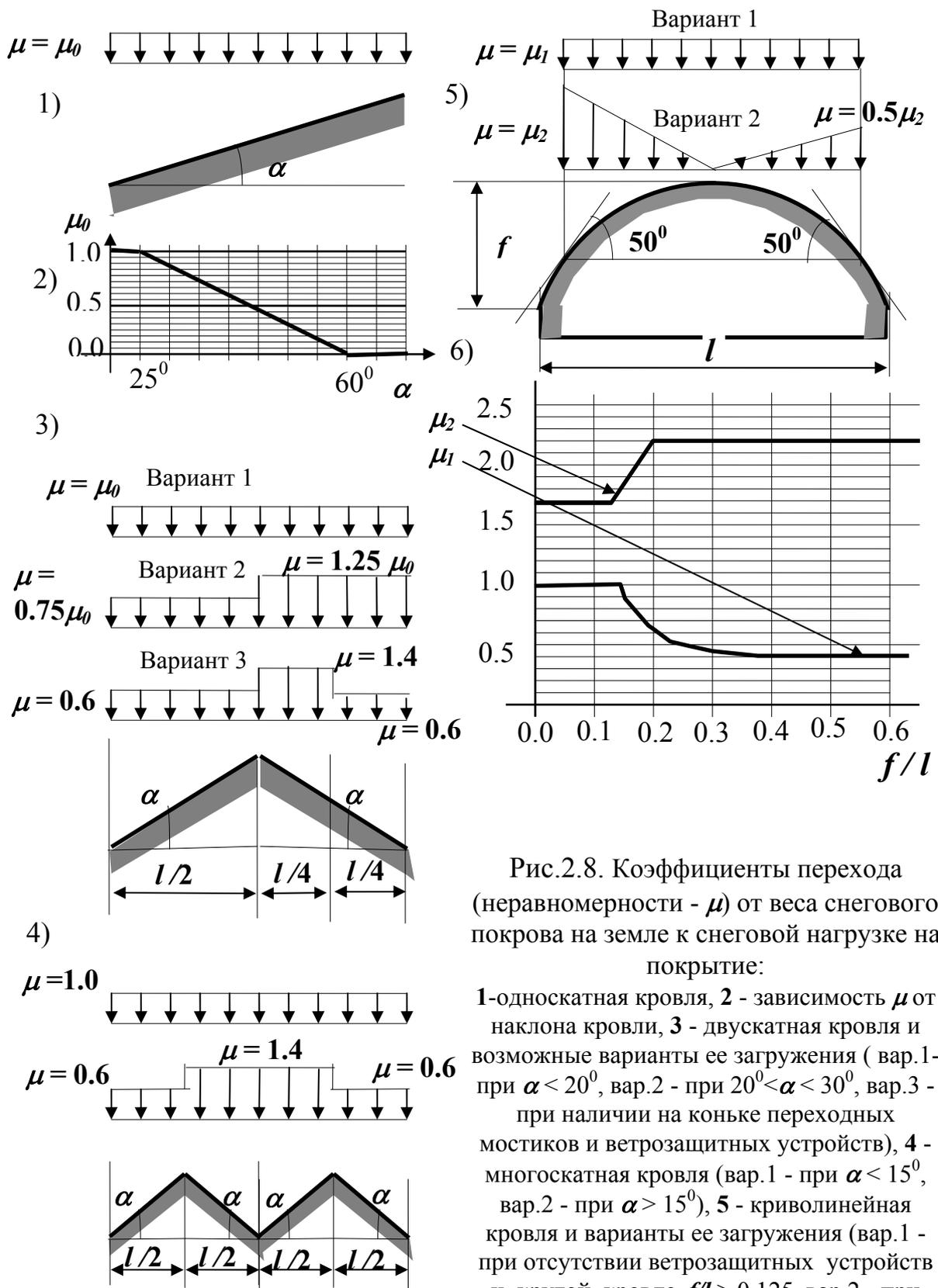


Рис.2.8. Коэффициенты перехода (неравномерности - μ) от веса снеговой нагрузки на земле к снеговой нагрузке на покрытие:

1-односкатная кровля, 2 - зависимость μ от наклона кровли, 3 - двускатная кровля и возможные варианты ее загрузки (вар.1- при $\alpha < 20^\circ$, вар.2 - при $20^\circ < \alpha < 30^\circ$, вар.3 - при наличии на коньке переходных мостиков и ветрозащитных устройств), 4 - многоскатная кровля (вар.1 - при $\alpha < 15^\circ$, вар.2 - при $\alpha > 15^\circ$), 5 - криволинейная кровля и варианты ее загрузки (вар.1 - при отсутствии ветрозащитных устройств и крутой кровле $f/l > 0.125$, вар.2 - при пологой кровле и наличии ветрозащитных устройств), 6 - зависимость μ от крутизны кровли (отношения f/l)

требуется учитывать очертание кровли. Обобщение опыта по изучению расположения снега у препятствий показывает, что такое нагружение может быть вычислено с помощью коэффициентов неравномерности - μ . На рисунке 2.8 приведена выборка из норм по назначению этого коэффициента для различных форм покрытий.

Таким образом, снеговая нагрузка определяется, зависящим от района строительства, давлением снегового покрова на горизонтальную поверхность s_0 и очертанием кровли, которое характеризуется коэффициентом неравномерности μ . Интенсивность давления определяется произведением

$$s = s_0 \cdot \mu \quad (2.6)$$

Пример 2.6. Определить снеговую нагрузку на двускатное одноэтажное здание, профиль которого показан на рисунке 2.7. Район строительства - г. Хабаровск.

Решение. Город Хабаровск относится ко второму снеговому району (рис. 2.6), давление снегового покрова на горизонтальном участке в затишье (см. табл.2.4) $s_0 = 0.7$ кПа. Угол наклона кровли определим по заданным размерам (см. рис.2.8):

$$\alpha = \arctg (3.0/6.0) = 27^\circ,$$

поэтому μ находим по графику (рис.2.8, 2),

$$\mu_0 = (60 - 27)/(60 - 25) = 0.94.$$

Покрытие может быть загружено снегом по второму варианту (рис.2.8, 3).

Интенсивность нагрузки:

с левой стороны

$$\mu = 0.75 \cdot \mu_0 = 0.75 \cdot 0.94 = 0.7;$$

$$s = s_0 \cdot \mu = 0.7 \cdot 0.7 = 0.49 \text{ кПа};$$

с правой стороны

$$\mu = 1.25 \cdot \mu_0 = 1.25 \cdot 0.94 = 1.18;$$

$$s = 0.7 \cdot 1.18 = 0.83 \text{ кПа}.$$

Эпюра давления показана на рисунке 2.7. Она может быть реализована в прямом и в зеркальном отображении.

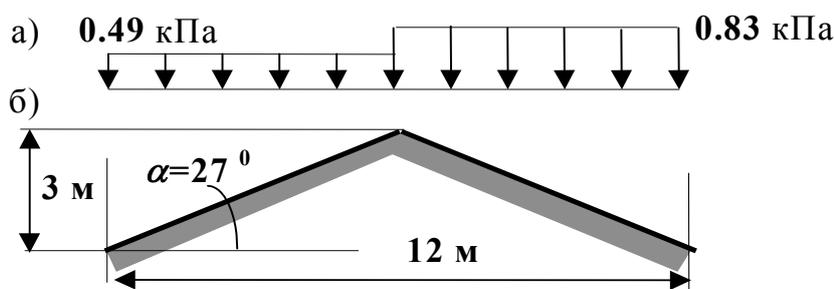


Рис. 2.7. Двускатная кровля
а - нагрузка, б - форма кровли

Пример 2.7 (для самостоятельного решения). Определить снеговую нагрузку на здания, профиль которых изображен на рисунке 2.9, при эксплуатации их в различных районах Дальнего Востока: в городах Магадане, Петропавловске-Камчатском и Владивостоке

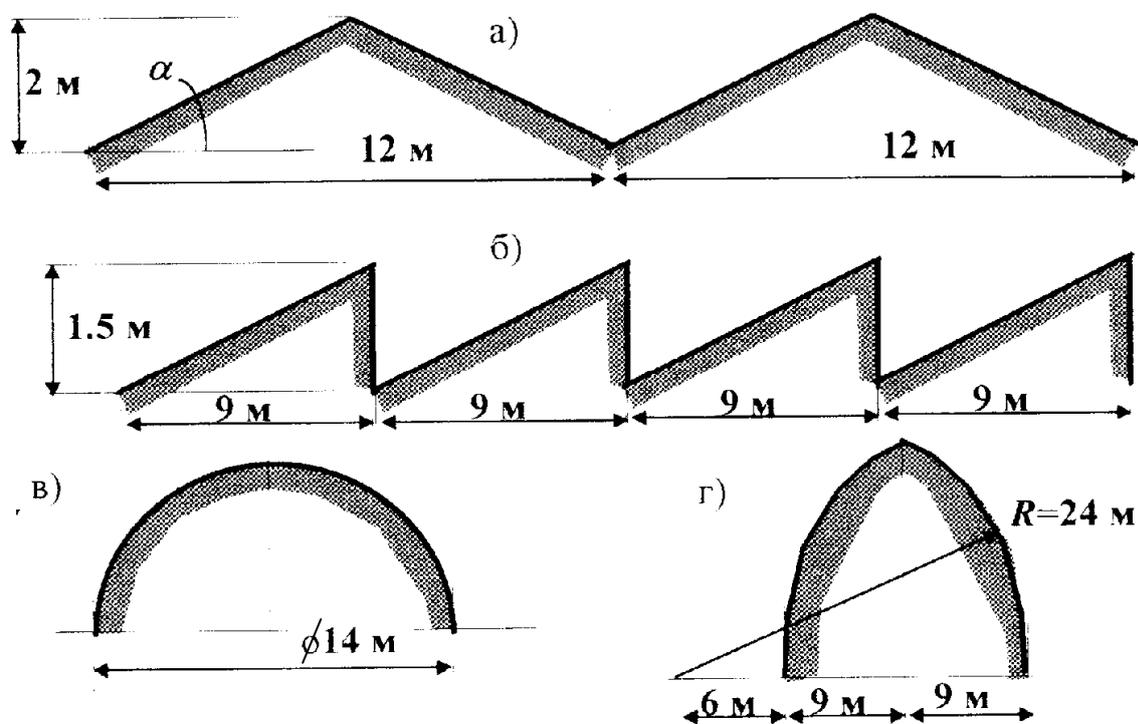


Рис. 2.9. Покрытия

а – двускатное двухпролетное, б – шедовое, в – арочное, г - стрельчатое

Замечания по модели разрушения гравитационной нагрузки. Отметим, однако, что гипотеза об отсутствии горизонтальных связей в материале при нахождении величины гравитационной нагрузки не всегда оправдана и приводит к существенному завышению нагрузки. Особенно это показательно в том случае, когда высота столба материала соизмерима с размерами несущей конструкции, на которую передается его вес (рис.2.10, 2.11).

Примером такой нагрузки является давление высокой кладки на перемычку оконного или дверного (оконного) проема. Повседневная практика позволяет относительно точно представить картину разрушения: при удалении перемычки разрушится только часть кладки (см. рис.2.10). При этом образуется некоторый свод с передачей нагрузки на опоры, а на перемычку будет оказывать давление только разрушившаяся часть кладки.

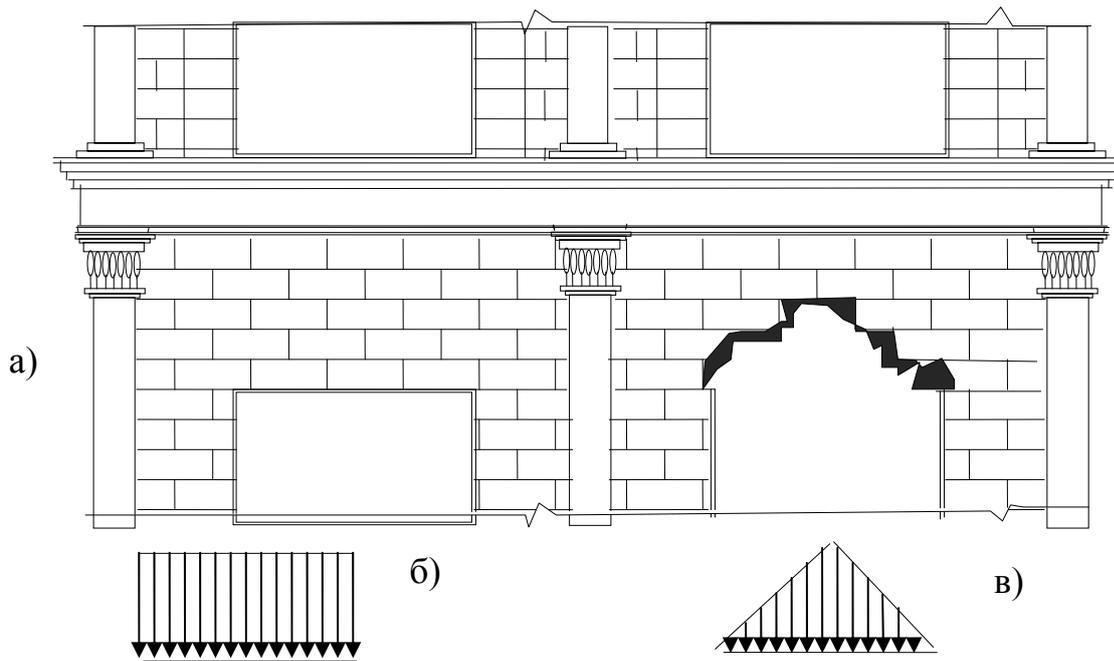


Рис. 2.10. Разрушение стены над перемычкой нижнего этажа (а) палаццо Ручелай (Венеция) и схема нагрузки на нее по гипотезе разрушения гравитационной среды (б) и загрузка от веса выпавшей кладки (в)

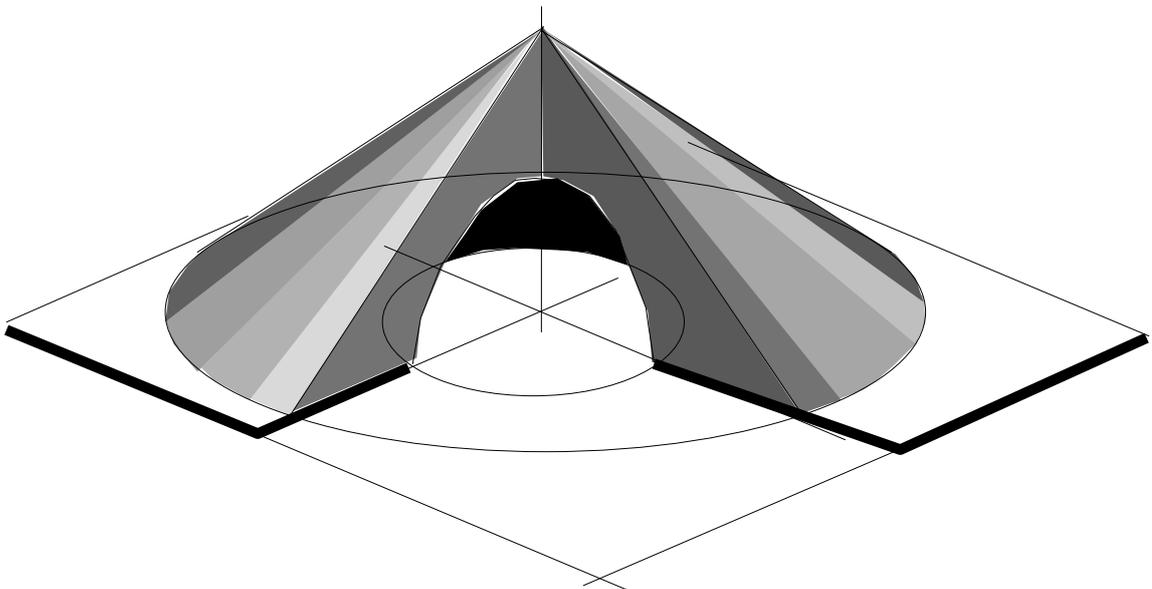


Рис.2.11. Потерна над отверстием в насыпи гравия - свидетельство условности гипотезы разрушения гравитационной среды

Несмотря на недостатки гипотеза разрушения, принятая в теории давления гравитационной среды, в большинстве случаев вполне приемлема и широко используется на практике.

2.3. Боковая нагрузка от несвязных сред

Хотя причиной бокового давления является та же тяжесть, но ввиду отличия гипотезы разрушения от той, которая была рассмотрена ранее - при вычислении гравитационной нагрузки, мы разберем эту нагрузку отдельно.

Одним из примеров несвязных сред может выступать сыпучее тело - грунт, зерно и др. Оно представляет собой совокупность твердых частиц, сцепление между которыми незначительно. Сыпучее тело сохраняет свою форму лишь в том случае, если оно ограничено так называемым углом естественного откоса (углом внутреннего трения). Поэтому если сыпучее тело засыпано в сосуд, оно является причиной давления не только на горизонтальную, но и на вертикальную (наклонную) поверхность или причиной бокового давления.

Схему разрушения несвязного тела можно представить, если перемещать ограждение в сторону от засыпки (рис.2.12). Как показывает опыт, от сыпучего тела отделится некоторая часть *ABC*, которая сползает по некоторой поверхности *BC* и поверхности ограждения *AB*. Кривизна поверхности *BC* незначительна и ее можно считать плоскостью. Поэтому поверхность *BC* называют плоскостью обрушения, а часть сыпучего тела *ABC* - призмой обрушения (высота призмы - в направлении перпендикулярном плоскости чертежа).

Таблица 2.5
Средние углы внутреннего трения и удельные веса
грунтов и пшеницы

Наименование сыпучего тела	Удельный вес, кН/м ³	Угол внутреннего трения, градусы
Песок сухой	16	30
Песок влажный	18	40
Песок мокрый	20	25
Глина сухая	16	40
Глина мокрая	19	20
Гравий сухой	16	45
Гравий мокрый	20	30
Галька	18	30
Пшеница	7.5	30

Рассмотрим момент начала сползания, когда связи между грунтом и ограждением еще существуют, но напряжение в них максимально. К этому случаю могут еще применяться условия равновесия. Поэтому выделим призму обрушения и заменим действие отброшенных связей равнодействующими: *E* - в связях между ограждением и телом, а *R* - в

связях между частицами самого тела по поверхности обрушения. Из-за отсутствия сцепления и наличия только сил трения эти равнодействующие при движении должны отклониться от перпендикуляра к поверхности на соответствующий угол трения (φ_0 - угол трения сыпучего тела об ограждение и φ - угол внутреннего трения - значения его для некоторых материалов приведены в табл. 2.5) (см. рис. 2.12).

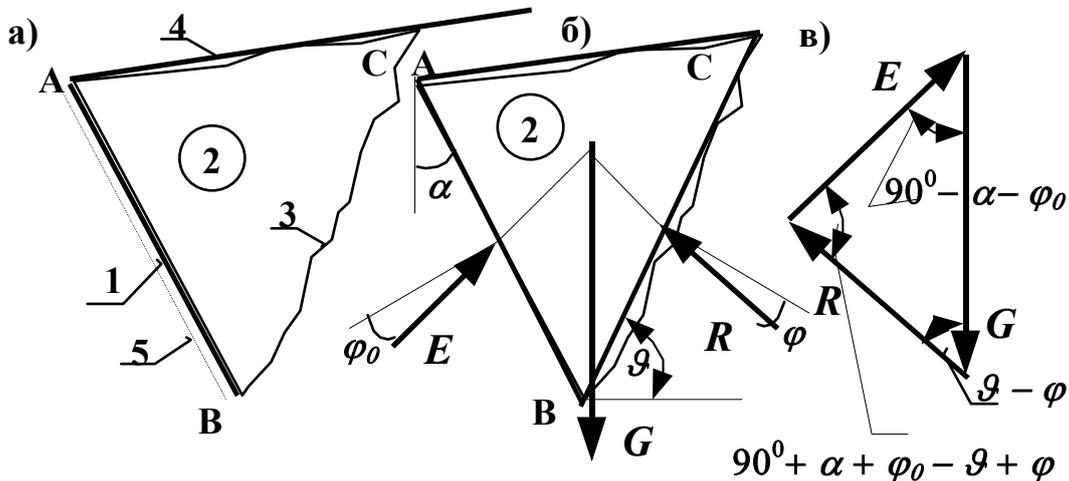


Рис. 2.12. Призма обрушения в сыпучем теле за подпорным сооружением

а - схема разрушения; б - силы, действующие на призму обрушения при ее сползании; в - силовой многоугольник;

1 - подпорное сооружение(ограждение), 2 - призма обрушения, 3 - поверхность обрушения, 4 - поверхность засыпки, 5 - положение напорной грани при сдвиге

Кроме реакций в связях на призму обрушения действует еще и ее собственный вес - G . Три силы E , R и G находятся в равновесии, если они пересекаются в одной точке и треугольник сил замкнут (см. рис.2.12). Для рассматриваемого момента предельного равновесия по теореме синусов (с учетом известного соотношения $\sin(90^\circ - \vartheta + \varphi + \varphi_0 + \alpha) = \cos(\vartheta - \varphi - \varphi_0 - \alpha)$) получим

$$\frac{E}{G} = \frac{\sin(\vartheta - \varphi)}{\cos(\vartheta - \varphi - \varphi_0 - \alpha)} \quad \text{или} \quad (2.6)$$

$$E = G \frac{\sin(\vartheta - \varphi)}{\cos(\vartheta - \varphi - \varphi_0 - \alpha)},$$

где ϑ - угол наклона плоскости обрушения к горизонту; α - угол наклона грани ограждения к вертикали (см. рис.2.12).

Но в правую часть выражения (2.6) входит неизвестный угол ϑ , который определяет и вес призмы обрушения. Поэтому Шарль Август Кулон (С.А. Coulomb, 1736 - 1806), теорию которого мы изложили выше, предложил вычислить угол ϑ , дающий максимальное давление E , то есть ввести дополнительное условие максимума

$$\frac{dE}{d\vartheta} = 0. \quad (2.7)$$

Пример 2.8. Вывести формулу для определения давления сыпучего тела с горизонтальной поверхностью на вертикальное ограждение ($\alpha = 0$). Углом трения сыпучего тела по ограждению пренебречь ($\varphi_0 = 0$)⁴. (Мы здесь не приводим чертеж к примеру 2.8, но при необходимости его легко можно выполнить самому читателю.)

Решение. Давление грунта при заданных параметрах определяется по формуле (2.6)

$$E = G \cdot \sin(\vartheta - \varphi) / \cos(\vartheta - \varphi) = G \cdot \operatorname{tg}(\vartheta - \varphi).$$

Вес призмы обрушения равен (в направлении, перпендикулярном чертежу примем размер ее равный единице)

$$G = (\gamma H^2/2) \operatorname{ctg} \vartheta.$$

Тогда

$$E = (\gamma H^2/2) \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{tg}(\vartheta - \varphi).$$

Для определения угла обрушения ϑ составим дополнительное уравнение (2.7)

$$\frac{dE}{d\vartheta} = \frac{\gamma H^2}{2} \left(\frac{1}{\sin^2 \vartheta} \operatorname{tg}(\vartheta - \varphi) + \frac{1}{\cos^2(\vartheta - \varphi)} \operatorname{ctg} \vartheta \right) = 0.$$

После преобразований (приведения к общему знаменателю, сокращений и замене $2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ на $\sin 2\alpha$)

$$-\sin 2(\vartheta - \varphi) + \sin 2\vartheta = 0,$$

откуда

$$2\vartheta - \varphi = \pi/2 \text{ и } \vartheta = \pi/4 - \varphi/2$$

Окончательно полное давление определится по формуле

$$E = (\gamma H^2/2) \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2) = (\gamma H^2/2) \kappa, \quad (2.8)$$

где $\kappa = \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2)$.

Подобным образом можно получить давление и для любого другого случая. В таблице 2.6 приведены формулы для вычисления κ в

⁴ В расчетах часто полагают $\varphi_0 = 0$, в особенности, если предполагается возможность попадания на напорную грань воды (смоченная поверхность) или имеется достаточно гладкая поверхность стенки (при использовании отформованных бетонных и железобетонных ограждений)

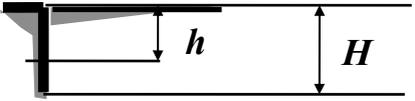
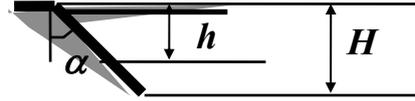
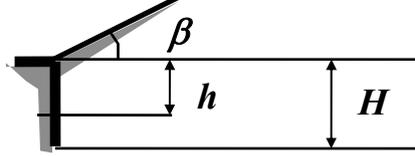
формуле (2.8) при наклонном ограждении и негоризонтальной засыпке (читатель может получить их самостоятельно).

Таблица 2.6

Давление сыпучих тел на ограждения при отсутствии трения грунта о стенку

$$E = (\gamma H^2/2)\kappa, \quad q = \gamma H \kappa$$

($\varphi_o = 0$)

Схема загрузки и засыпки	Формулы для определения параметра κ
<p>1.</p> 	<p>1.</p> $\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$
<p>2.</p> 	<p>2.</p> $\left(\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi + \alpha}{2}\right) + \operatorname{tg}\alpha\right)^2 \cdot \cos\alpha$
<p>3.</p> 	<p>3.</p> $\frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\delta + \operatorname{tg}\varphi}, \text{ где}$ $\operatorname{tg}\delta = \frac{\sqrt{\operatorname{tg}\varphi(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\beta)(1 - \operatorname{tg}^2\varphi) - \operatorname{tg}^2\varphi}}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\beta(1 + \operatorname{tg}^2\varphi)}$

Чтобы определить интенсивность давления сыпучего тела на поверхность, необходимо приращение силы E на высоте h отнести к приращению высоты, т. е.

$$q = \frac{dE}{dh} = \gamma \cdot h \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = \gamma \cdot h \cdot \kappa. \quad (2.9)$$

При $\varphi = 0$ получаем формулу интенсивности давления на горизонтальную, вертикальную и любую другую поверхность ($q = \gamma \cdot h$), совпадающую с (2.2) для среды, внутри которой отсутствует трение.

Таковыми средами являются, например, жидкости и газы. Вода и газ практически не сопротивляются сдвигу, то есть в них отсутствует трение. Поэтому их давление всегда перпендикулярно поверхности.

Пример 2.9. Определить давление сухого песка на подпорную стенку и построить эпюру распределения давления по высоте. Схема стенки показана на рисунке 2.13. Принять $\varphi_0 = 0$.

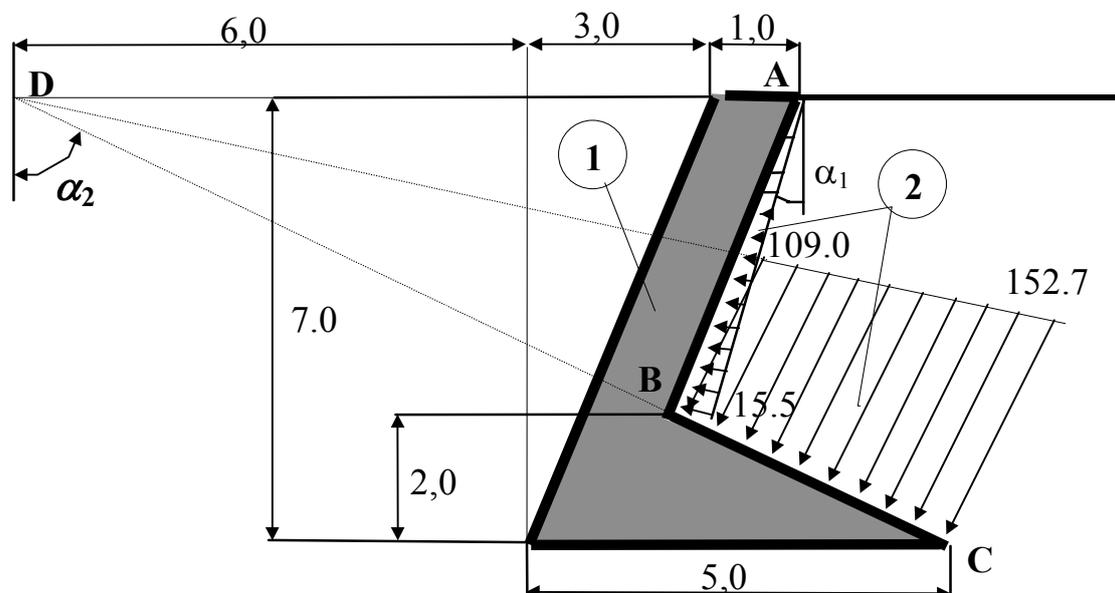


Рис. 2.13. Наклонная подпорная стенка (1) и эпюра давления сыпучего тела на нее (2)
(размеры даны в м, ординаты эпюры давления - в кПа)

Решение. Напорная грань стенки имеет излом на ребре В, поэтому давление будем определять на каждом участке в отдельности.
Участок АВ.

Определим угол наклона напорной грани ограждения
 $\alpha = -\arctg(3/7) = -23,2^\circ$.

Из таблицы 2.5 $\gamma = 16 \text{ кН/м}^3$, $\varphi = 30^\circ$.

По формулам таблицы 2.6 (схема 2)

$$\kappa = (\tg(45^\circ - (30^\circ + 23,2^\circ)/2) - 3/7)^2 \cos 23,2^\circ = 0,194.$$

Интенсивность давления

в точке А ($h = 0$) $q = 0$,

в точке В ($h = 5$) $q = \gamma h \kappa = 16 \cdot 5 \cdot 0,194 = 15,5 \text{ кПа}$.

Участок ВС.

Для определения давления на грань ВС образуем фиктивную напорную грань CD и рассчитаем давление на нее, а затем оставим только то давление, которое приходится на грань ВС.

Угол наклона грани

$$\alpha = -\arctg(11/7) = 57.5^\circ.$$

По формулам таблицы 2.6

$$\kappa = (\operatorname{tg}(45^\circ - (30^\circ - 57.5^\circ)/2) - 3/7)^2 \cos 57.5^\circ = 1.363.$$

Давление на грани BC

в точке B ($h = 5$) $q = 16 \cdot 5 \cdot 1.363 = 109.0$ кПа,

в точке C ($h = 7$) $q = 16 \cdot 7 \cdot 1.363 = 152.7$ кПа.

Эпюры давления построены на рисунке 2.13.

Пример 2.10. Определить давление гравийного грунта на вертикальную стенку. Высота стенки 5 м. На глубине 3 м обнаружена грунтовая вода (рис.2.14).

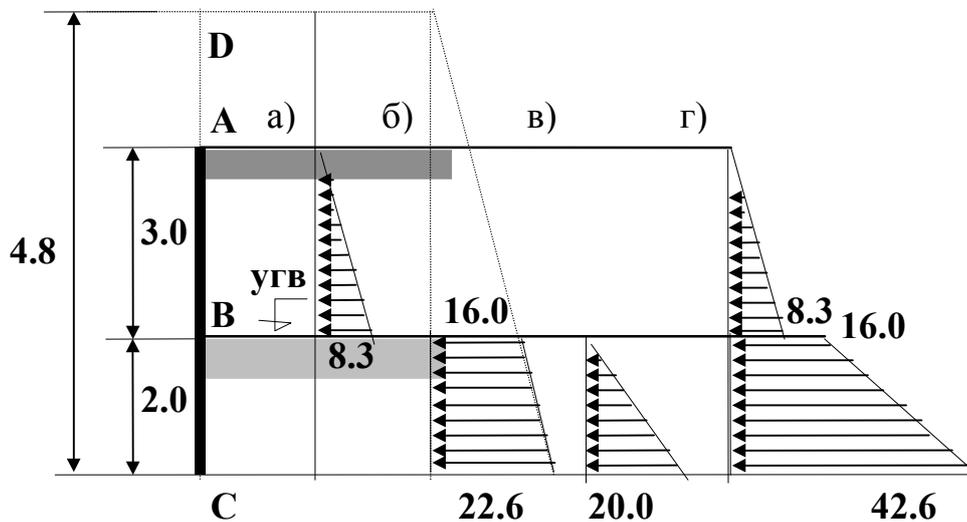


Рис. 2.14. Давление грунта, насыщенного водой:

а - эпюра давления на грань АВ; б - то же на грань DC;
в - давление воды; г - суммарная эпюра давления воды и грунта
(размеры даны в м, давление - в кПа)

Решение. Сначала определим давление сухого гравия на грань АВ ($\gamma = 16$ кН/м³, $\varphi = 45^\circ$ из табл. 2.6)

$$q = 0,$$

$$q = \gamma h \cdot \kappa = \gamma h \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2) = 16 \cdot 3 \operatorname{tg}(45^\circ - 45^\circ/2) = 8.3 \text{ кПа.}$$

Ниже уровня грунтовых вод гравий находится в воде и теряет в весе столько, сколько воды вытесняется его частицами. Так как удельный вес грунта полностью насыщенного водой (табл. 2.5) $\gamma = 20$ кН/м³, а сухого $\gamma = 16$ кН/м³, то с учетом взвешивающего действия ($\gamma_{\text{воды}} = 10$ кН/м³) воды удельный вес грунта в воде вычислим из следующих соображений.

Пусть объем сухих частиц в одном кубометре составляет $V_{\text{частиц}}$. Тогда его величину в единице объема грунта можно определить из соотношения

$$(1 - V_{\text{частиц}}) \cdot 10 + 16 = 20,$$

откуда $V_{\text{частиц}} = 0.6$, и поэтому удельный вес взвешенного в воде грунта равен $\gamma_{\text{грунта в воде}} = 16 - 0.6 \cdot 10 = 10 \text{ кН/м}^3$

Таким образом, грунт за стенкой имеет разный объемный вес (16 кН/м^3 вверху и 10 кН/м^3 внизу) и разные углы внутреннего трения (вверху $\varphi = 45^\circ$, внизу $\varphi = 30^\circ$). Чтобы привести их к однородному по объемному весу, увеличим высоту верхнего слоя (см. (2.3)) на

$$h_{\text{экв}} = h \cdot \gamma / \gamma_{\text{экв}} = 3 \cdot 16 / 10 = 4.8 \text{ м.}$$

Определим давление на ограждение высотой $2 + 4.8 = 6.8 \text{ м}$ (ДС на рис. 2.14). Кроме того, изменим угол $\varphi = 30^\circ$, тогда

$$q = \gamma \cdot h \cdot \kappa = \gamma \cdot h \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \varphi / 2) = 10 \cdot 6.8 \cdot 0.333 = 22.6 \text{ кПа,}$$

$$q = 10 \cdot 4.8 \cdot 0.26 = 16.0 \text{ кПа.}$$

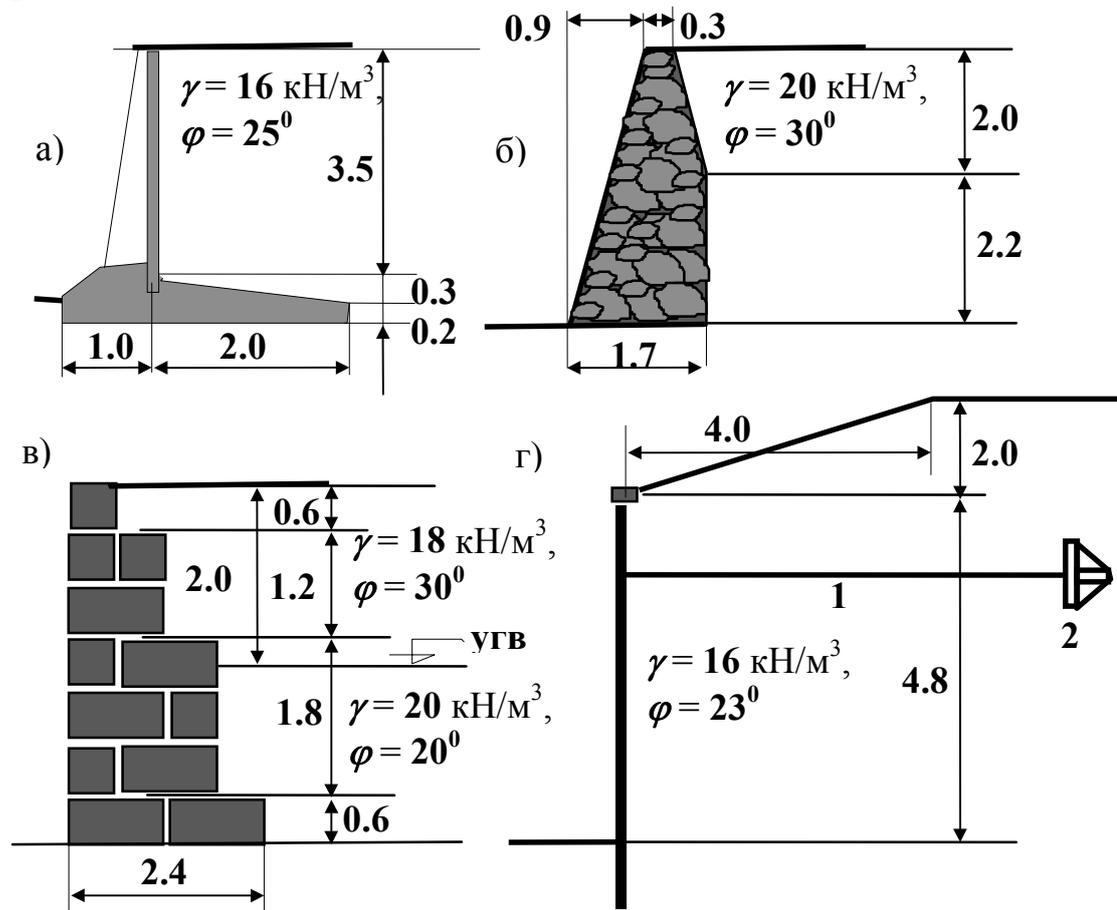


Рис.2.15. Подпорные стенки и характеристики засыпки:
 а - железобетонная уголкового типа стенка, б - бутовая стенка,
 в - стенка из фундаментных блоков, г - шпунтовая стенка (больверк);
 1 - анкерная тяга, 2 - анкер

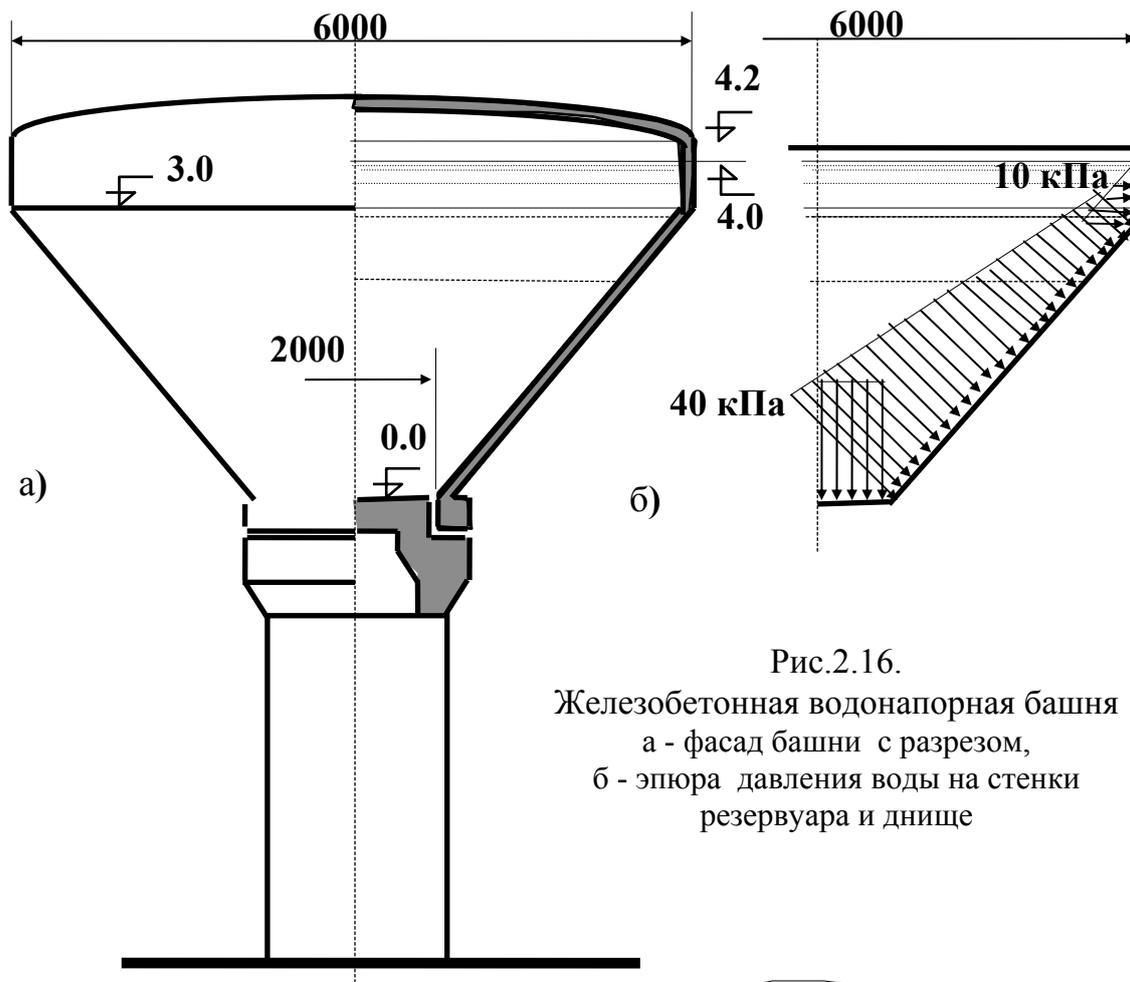


Рис.2.16.
Железобетонная водонапорная башня
а - фасад башни с разрезом,
б - эпюра давления воды на стенки
резервуара и днище

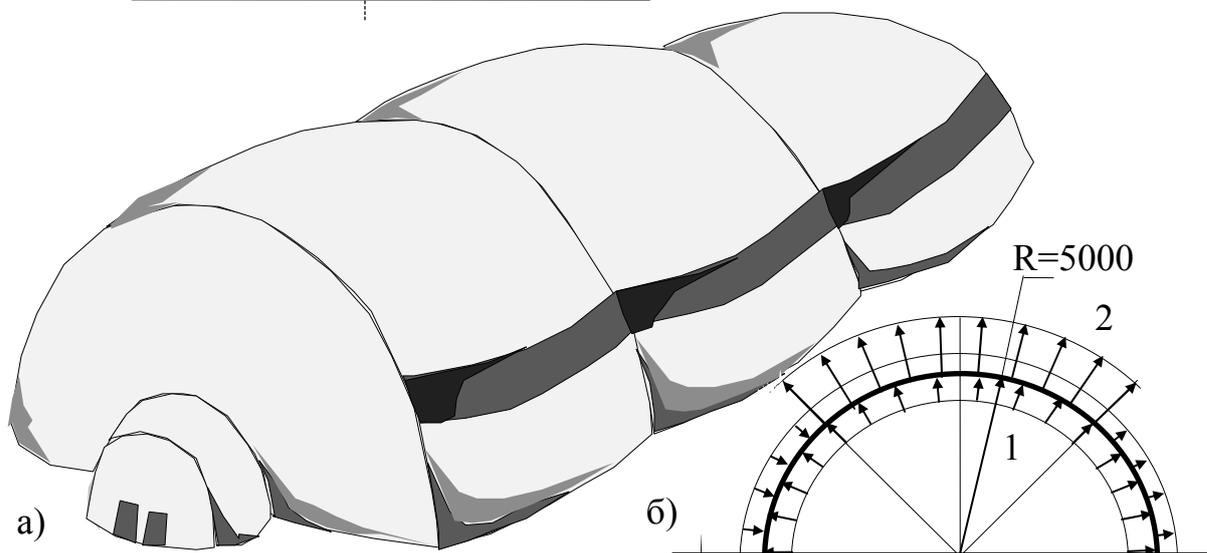


Рис.2.17. Воздухоопорный склад
а - общий вид склада; б - нагрузка на оболочку;
1 - избыточное внутреннее давление; 2 - ветровая нагрузка (ветер слева)