

ОВОИДНЫЙ ГЕОКУПОЛ С УВЕЛИЧЕННЫМИ НЕСУЩИМИ СТЕНОВЫМИ ПАНЕЛЯМИ

ИД «БАУбизнес», Киев, Украина

Представлены концепция и проектное предложение быстровозводимого энергоэффективного дома в виде овоидного геокупола из несущих теплоизолирующих конструктивных панелей из унифицированных элементов увеличенного размера с малоотходным раскрытием стеновых материалов. Показаны особенности геометрии и конструкции, широкая унификация стеновых несущих панелей, возможность применения промышленных способов строительства с высокой степенью префабрикации (заводской готовности) элементов оболочки здания, описаны схемы предварительной сборки элементов и транспортировки комплекта для крупноузловой сборки, а также способ быстрого монтажа и возведения оболочки всего здания. Показана независимость конструктивного исполнения стеновых несущих конструкций и их толщины от геометрии овоидного геокупола, что дает возможность применения различных технических решений и материалов для изготовления несущих теплоизолирующих стеновых панелей, тем самым расширяя круг возможных предприятий-изготовителей. Также показаны особенности геометрии здания для достижения солнцезащиты от летнего перегрева помещений и увеличения доли тепла от солнечных лучей в холодное время года при высокой степени естественной освещенности помещений здания.

Постановка проблемы. Необходимость в массовом экономичном строительстве энергоэффективного быстровозводимого частного жилья в Украине в нынешнее время представляется особенно актуальной.

Широко известна форма зданий в виде т.н. геокупола [1, 2, 3, 4, 5]. Считается, что геокупол – очень прочная, жесткая и энергоэффективная форма для здания, дающая преимущества для минимизации теплопотерь и существенную экономию стеновых материалов за счет максимального внутреннего объема при минимальной площади поверхности, соотносящихся между собой пропорционально радиусу кривизны прилегающей к геокуполу описанной поверхности в степени $3/2$.

На практике, для всех применяемых способов аппроксимации сферической поверхности в многогранные плоские элементы и обычной (каркасной) технологии возведения, ни одно из заявленных преимуществ геокуполов для жилых зданий небольшого размера не соответствует действительности.

Анализ основных исследований. В специальной литературе достаточно широко описаны проблемы, связанные с проектированием,

расчётом и технологией возведения геокупольных сооружений. В своем большинстве геокуполы продолжают оставаться уникальными сооружениями [3, 4], а в зависимости от способа аппроксимации криволинейной поверхности, они обычно строятся из элементов с неповторяющимися угловыми и линейными размерами или из элементов с очень малой степенью унификации (ребристо-кольцевые купола, [2, 5]). Можно сказать, что все детали для стен геокуполов изготавливаются индивидуально, а чаще – по месту. Это препятствует широкому распространению геокупольных конструкций для индивидуального жилья и использованию для них промышленных методов строительства, что в целом крайне удорожает стоимость и сроки возведения геокупольных жилых зданий; особенно это ограничение справедливо для строительства из элементов с высокой степенью заводской готовности.

Именно геометрия куполов и выбранные материалы играют определяющую роль и влияют на технологические особенности и стоимостные параметры при строительстве геокупольных зданий [5], диктует техническое решение для реализации конструкции оболочки здания [2]. Если для условно плоских видов элементов геокупольной конструкции (листовое стекло, металлические или сотовые тонкие листы и т.п.) трудности реализации обычно ограничиваются точным изготовлением каркаса, элементов крепежа и раскроя плоских заготовок, сложностями маркировки и логистики множества деталей и высокой трудоемкостью монтажа [1, 5], то у жилых сооружений сложность их геометрии приводит, как правило, к невозможности создать теплоизолированную оболочку с параметрами, соответствующими нормативным требованиям по энергосбережению, не говоря уже о требованиях, предъявляемых к пассивным домам.

Это приводит к тому, что геокупольные оболочки жилых домов обычно изготавливаются из рулонных материалов, укладываемых поверх каркаса, а неточности и зазоры приводят к обилию скрытых мостиков холода и другим дефектам теплоизоляции.

Но главным недостатком традиционных геокупольных конструкций оказывается то, что, на практике, из-за сложной геометрии при их изготовлении происходит значительный перерасход при раскрое стеновых материалов (как листовых, так и панельных), порой даже превышающий теоретическую разницу в площади оболочки для геокупольных и традиционных сооружений в виде параллелепипеда.

Постановка задачи. Поиск геометрии оболочечной конструкции для индивидуального жилого дома с минимальными отходами при раскрое стеновых материалов стал главным побудительным мотивом для проектирования и представляемого здесь технического решения. Цель статьи – ознакомить с подходом для поиска геокупольного жилья новой формы и с результатами эскизного проектирования, полученными для двухэтажного дома с мансардой.

Основная часть. Обычный способ аппроксимации сферической поверхности геокупола ведется в направлении огрубления степени приближения заменяющей ее пространственной многоугольной формы, он состоит в поиске компромисса между желаемыми максимальными размерами плоских многоугольных элементов и подобия итоговой формы к полусфере. Вторая обычная особенность геокуполов – расположение вершины многогранной системы на самом верху, т.е. при вершине заменяющего сферу пространственного многогранника обычно имеется схождение, стык множества ребер, граней и зауженных мест плоских деталей.

Автор применил для выбора геометрии геокупола подход «от обратного» – аппроксимация проводилась от простейших правильных геометрических тел, вписанных в сферу, к более сложным формам. Главный критерий достаточности степени аппроксимации – получение элементов с оптимальным (малоотходным) раскроем стеновых материалов.

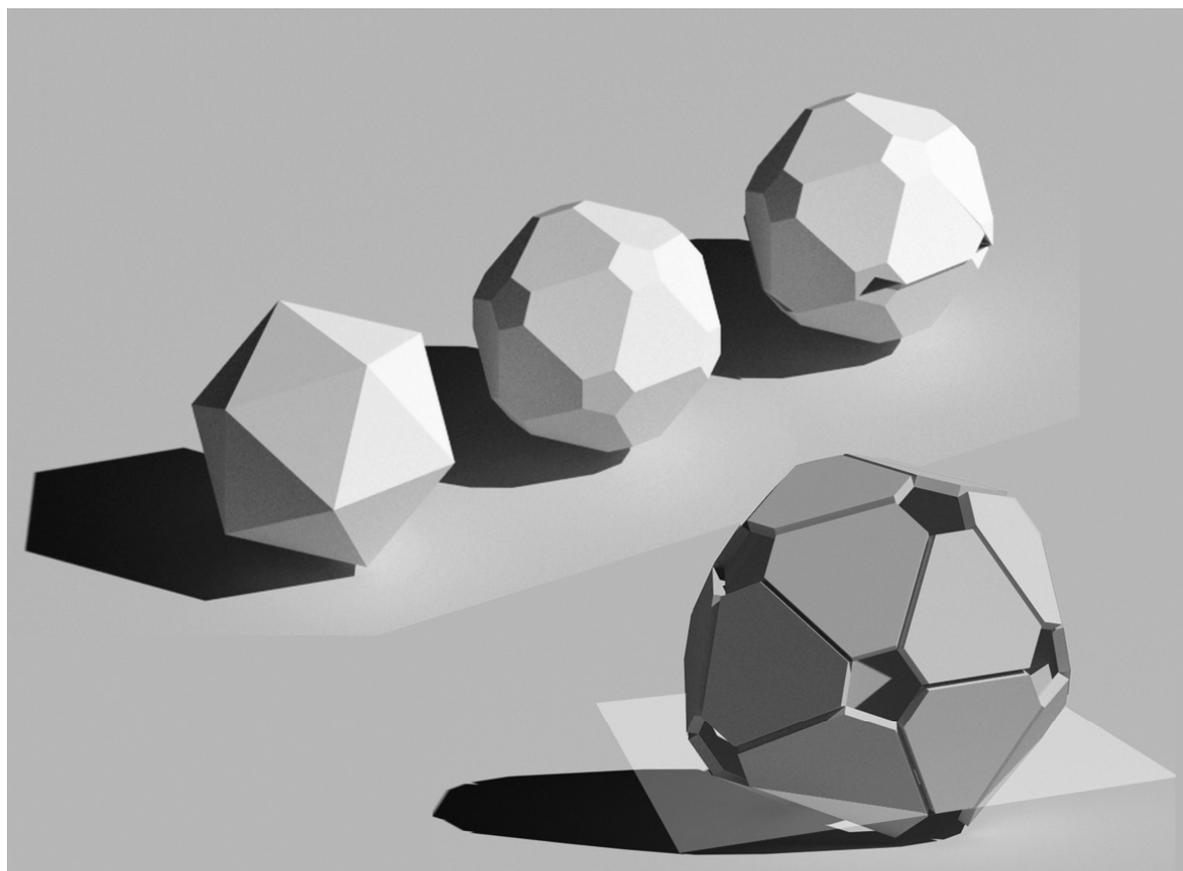
Последовательно проводя анализ, начиная с правильной треугольной пирамиды, куба, додекаэдра, икосаэдра, правильного фуллерена, выбор замещающего тела был сделан в пользу полуправильного усеченного икосаэдра (рис.1а)), который имеет 12 пятиугольных и 20 шестиугольных граней, при этом его шестиугольники имеют 2 пары по 3 одинаковых ребра, а пентагоны остаются правильными многоугольниками.

Кроме того, в верхней части геокупола была размещена не вершина, как обычно, а грань пространственного многоугольника – т.е. сфероид был повернут вокруг горизонтальной оси (рис.1 б)). Основная плоскость (плоскость «нулевого» уровня) была выбрана по нижним коротким граням нижних «лицевых» шестиугольных элементов.

Выбор геометрии шестигранника и примерная схема для раскроя несущих теплоизолирующих конструктивных панелей показаны на рис. 1 с), а на рис. 1 d) – примерная схема раскроя с минимальными отходами из прямоугольных элементов с соотношением сторон 1:2 см, например, из SIP-панелей толщиной 20 см и размерами 1200х2400 мм. Размеры строительной панели (например, SIP) приведены ориентировочно. Точные размеры шестигранника можно получить после конструкторско-технологической проработки и уточнения размеров обвязки несущего элемента, раскроя деталей панели, размеров внутреннего каркаса. Размеры прямоугольной строительной панели были выбраны как очень часто встречающееся сочетание минимальных размеров при поставке различных листовых материалов, габаритов изолирующих панелей разной конструкции и шага, обычно применяемого для каркасных конструкций с заполнением из пористых материалов (минеральная вата и т.п.)

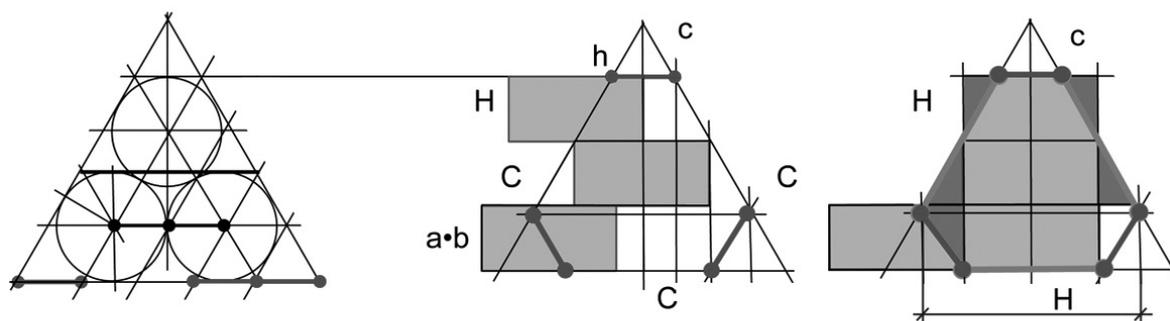
В результате была получена рабочая геометрическая форма для проектирования жилого двухэтажного дома с мансардой, которая приближена к сфере. Для улучшения будущей планировки дома было решено трансформировать пространственный многогранник ближе к

эллипсоидной форме путем разворота двух прилегающих групп из пяти шестиугольников вокруг оси верхнего ребра.



a)

b)



$$c = 2r / (3)^{1/2}; 2r = D; C = > 2r + 3c = 2r + 6 / (3)^{1/2} \cdot r = 2r \cdot (1 + (3)^{1/2})$$

$$a \cdot b \approx 1200 \cdot 2400 \text{ мм}; h = r; H - h = H - r = 3a \approx 3 \cdot (1200) \approx 3600 \text{ мм}$$

c)

d)

Рис.1. а) аппроксимация сферы от икосаэдра к усеченному полуправильному икосаэдру; б) основная рабочая форма заменяющего пространственного многогранника – наверху расположено ребро, а ниспадающие шестигранники образуют форму двускатной крыши, по нижнему ребру нижнего «лицевого» элемента показана плоскость, определяющая «нулевой» уровень; в) геометрия шестигранника – фигура, описанная вокруг трех одинаковых окружностей; д) примерная схема малоотходного раскроя теплоизолирующих несущих панелей из прямоугольников со сторонами 1:2.

Решено было полностью отказаться от формообразующего каркаса.

Роль силового каркаса геокупола выполняет обвязка несущих панелей, соединенная поворотными замковыми шарнирами, закрепленными вдоль длинных граней панельных элементов.

Для проверки геометрии геокупола при трансформации из сфероидной формы в продолговатую было применено компьютерное 3D-моделирование. На рис. 2 а) показана «раскладка» (развертка) крупнопанельных элементов, соединенных шарнирами, их номенклатура, внешний вид на внутреннюю поверхность (рис. 2 б), шарнирное соединение панелей (ось шарнира – вдоль граней панелей, обращенных внутрь (рис. 2 с)), схема трансформации (расширения) «лицевых» панелей (рис. 2 д) путем разворота боковых граней относительно вершины. Две их параллельные грани при этом удлиняются. После нескольких шагов 3D-моделирования трансформации угол при вершине расширенных панелей был назначен 75° , как весьма удобный для точного воспроизведения.

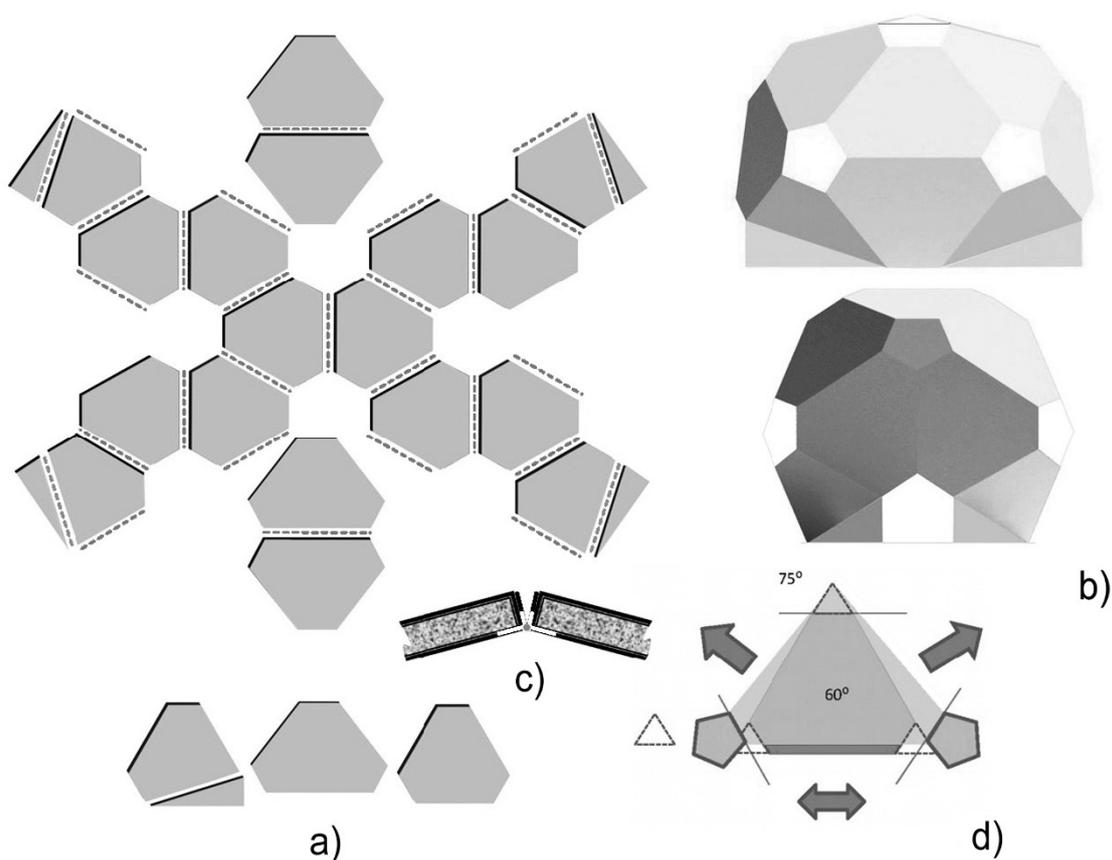


Рис. 2. Результат 3D-трансформации: а) номенклатура крупнопанельных элементов, соединенных шарнирами, и их раскладка; б) внешний вид на внутреннюю поверхность геокупола; с) шарнирное соединение панелей по внутренней поверхности; д) схема трансформации (расширения) «лицевых» панелей.

3D-моделирование показало, что при трансформации правильный верхний пентагон, который в сфероидной форме оставался полностью

лежащим в одной плоскости, получил «излом» и теперь состоит из примыкающих треугольника и трапеции, а для того чтобы нижний вспомогательный элемент трапециевидной формы оставался полностью плоским, без излома, необходимо было несколько развернуть нижние лицевые расширенные панели по их длинной грани вокруг оси шарниров. То есть, основание геокупола теперь стало несколько шире, а нижние лицевые панели – более вертикальными. Таким образом, описанная прилегающая поверхность при трансформации из сфероида утратила свою горизонтальную ось вращения, и теперь геокупол стал скорее овоидом – некоей оболочечной формой, напоминающей яичную скорлупу.

Несущие конструкционные теплоизолирующие панели составляют принципиально прочную и жесткую компактную форму овоида. Все элементы (несущие панели) подразделяются на 4 унифицированные группы: 10 основных элементов, еще 4 основные расширенные («лицевые») элемента, 4 вспомогательных стеновых элемента и 4 малых опорных элемента – все детали в итоге соединены шарнирами, легко перевозятся и быстро монтируются прямо на месте застройки.

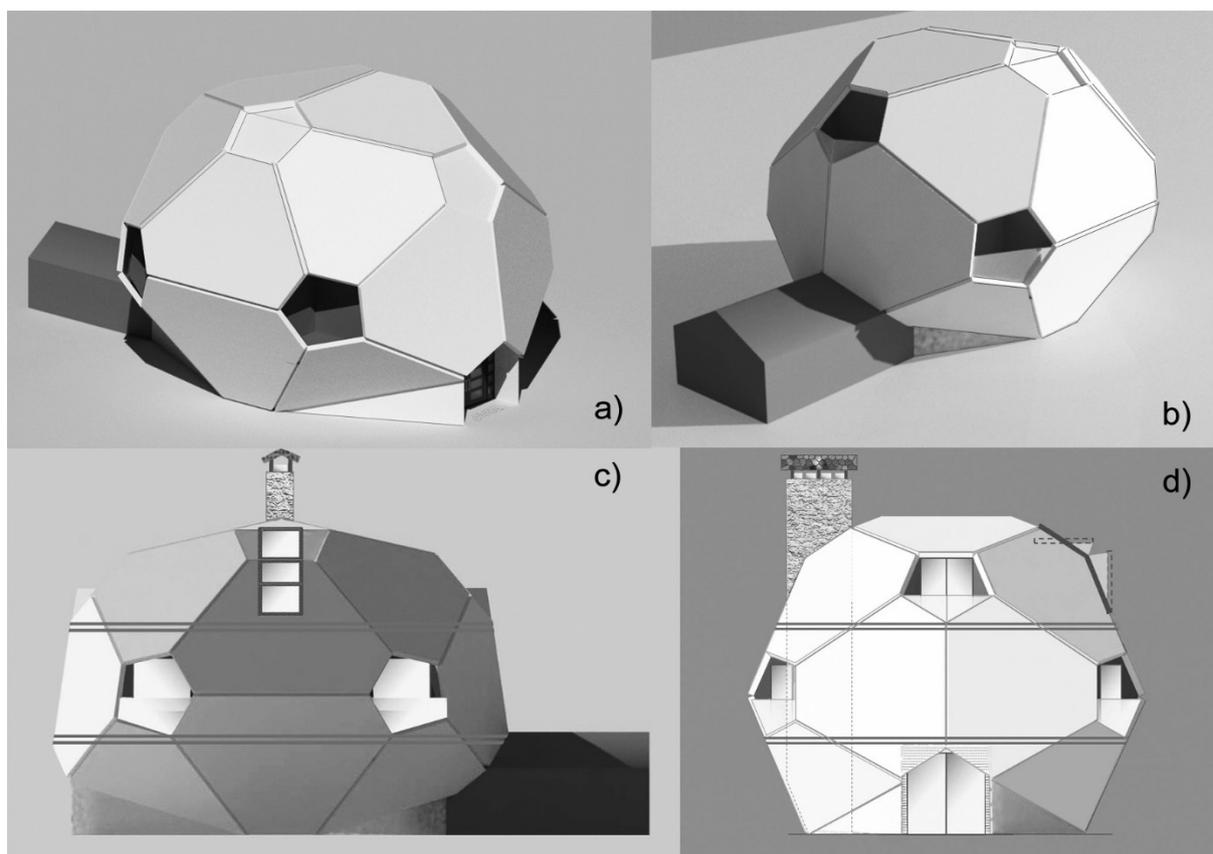


Рис. 3. 3D-моделирование наружной формы двухэтажного дома с мансардой в виде овоидного геокупола: а) «утопленная» входная группа с «козырьком»; б) на 2-м этаже – 4 балконные ниши с навесами, с) 2 балкона мансарды с двух сторон и сверху накрыты свесами панелей крыши; д) колонна дымоходов и вентканалов.

Из рис. 3 видно, что увеличение толщины панели (что означает применение вместо SIP-панелей толщиной 20 см теплоизолирующих

несущих панелей любой другой конструкции, из других материалов, в т.ч. «экологически чистых», например, сотовых деревянных панелей типа Dendrolight или несущих панелей с наполнителем из прессованной термомодифицированной соломы – «страмита») не изменяет геометрии внутреннего пространства овоида. Увеличение габаритов прямоугольных строительных панелей, из которых выкраивается несущая панель овоида, в итоге масштабирует внутренние размеры, а увеличение толщины панелей приводит к увеличению высоты в нижней части, что компенсируется выбором размеров малых опорных элементов треугольной формы.

Т.о., следующей основной задачей при 3D-моделировании экстерьера и размеров внутренних элементов здания была проверка, возможно ли при размерах строительных панелей 120x240x20 см (т.е., когда габариты основного элемента овоида – 360x360x20 см) получить эргономичные размеры внутреннего пространства, удобные подъемы и ширину лестниц, нормальные габариты дверей и оконных проемов, приемлемую высоту потолков, размеры балконов и входных групп.

Некоторые особенности наружной формы: входная группа в виде параллелепипеда «утоплена» и имеет «козырек», гараж (крытая терраса, остекленная веранда и т.п.) примыкает снаружи – шире и несколько выше входной группы; все 4 балконные ниши 2-го этажа и 2 ниши на мансарде имеют «навесы», ограждение балконных ниш – безопасное ламинированное остекление; колонна дымоходов и вентканалов вписана в размеры проема для комбинированной мансардной оконной группы, которая используется и как балконное ограждение лестничной площадки.

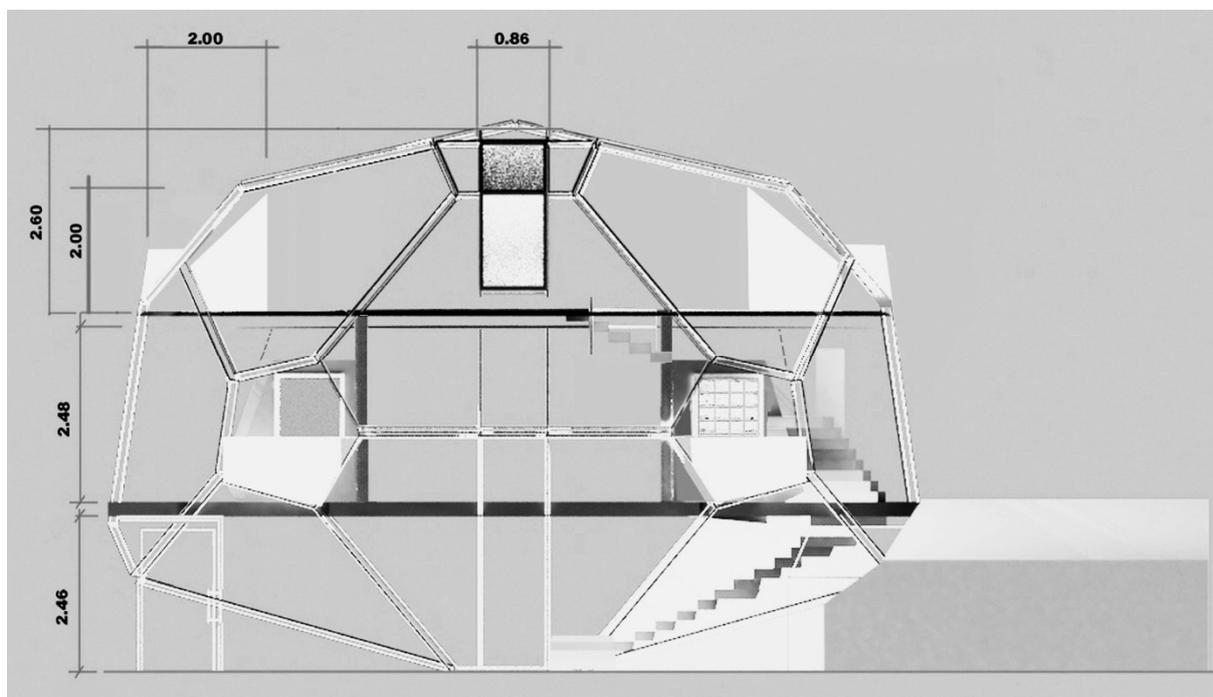


Рис. 4. Основные размеры высоты внутреннего пространства

Результат 3D-проверки размеров внутреннего пространства представлен на рис. 4. Толщина межэтажного перекрытия принята 28 см.

Были получены вполне эргономичные основные размеры высоты потолков, что позволило распланировать помещения, вырезы полов и расположение широких лестниц с рекомендованными удобными углами подъема, расположенных вдоль наклонных стен, применить дверные проемы из ряда типичных размеров, что показано на рис. 5 и 6.

Поэтажная планировка (рис. 5 и 6) подтвердила, что даже при минимальных размерах панелей овоидного геокупола (габарит 3,6х3,6 м) достигается просторность помещений, удобные углы подъема лестниц, короткие маршруты передвижения и короткие инженерные коммуникации – водоснабжение, нагрев воды, отопление, вентиляция, канализация, энергоснабжение. Благодаря рациональной схеме компоновки инженерных систем на мансарде тоже можно устроить полнофункциональные санузлы.

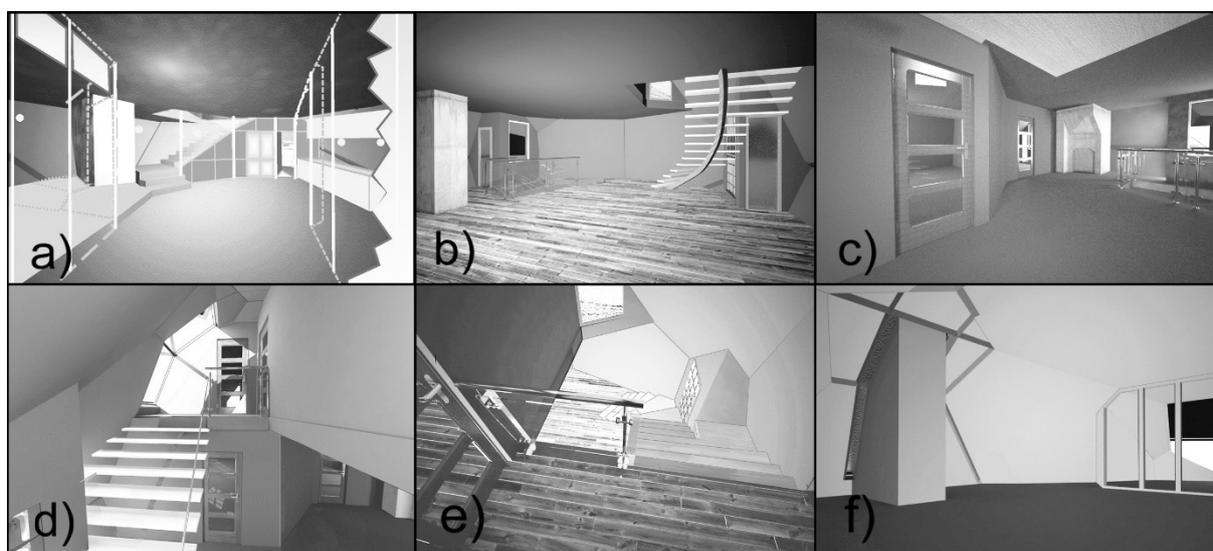


Рис. 5. 3D-моделирование внутреннего пространства: а) 1-й этаж; б) выход на 2-й этаж и лестница на мансарду; с) каминный зал на 2-м этаже; d) лестница на мансарду; е) вид с лестничной площадки мансарды на 2-й этаж f) колонна дымоходов и вентканалов на мансарде и часть остекления выхода на балкон.

На 1-м этаже размещен многофункциональный отопительный агрегат, служащий одновременно и массивным тепловым аккумулятором (что очень важно при изготовлении оболочки здания из элементов с малой теплоемкостью, например, из SIP-панелей), в колонне дымоходов которого проложены вентканалы для эффективной естественной вентиляции и подачи зимой подогретого воздуха на 2-й этаж и мансарду. Имеется место для установки наружных систем теплового насоса «земля-вода» и энергосберегающей автоматики, включая систему «умный дом».

Расположение световых остекленных проемов и «козырьки» для солнцезащиты на всех балконах (рис. 6 с), d)) обеспечивают круглогодичное естественное освещение в течение всего светового дня.

Помимо предусмотренных мер по энергосбережению, включая рекуперацию энергии при вентиляции, применению световых фонарей, комбинированных со светодиодным освещением и с проветривателями,

балконные «козырьки», сама форма и наклон панелей овоидного геокупола также обеспечивают «геометрическую солнцезащиту» стен и световых проемов от «высокого» летнего солнца и свето-теплопропускание от утреннего, вечернего и низкого "зимнего" солнца (рис. 6 а), b), c)), что вносит значительный вклад в тепловой баланс и экономит энергию.

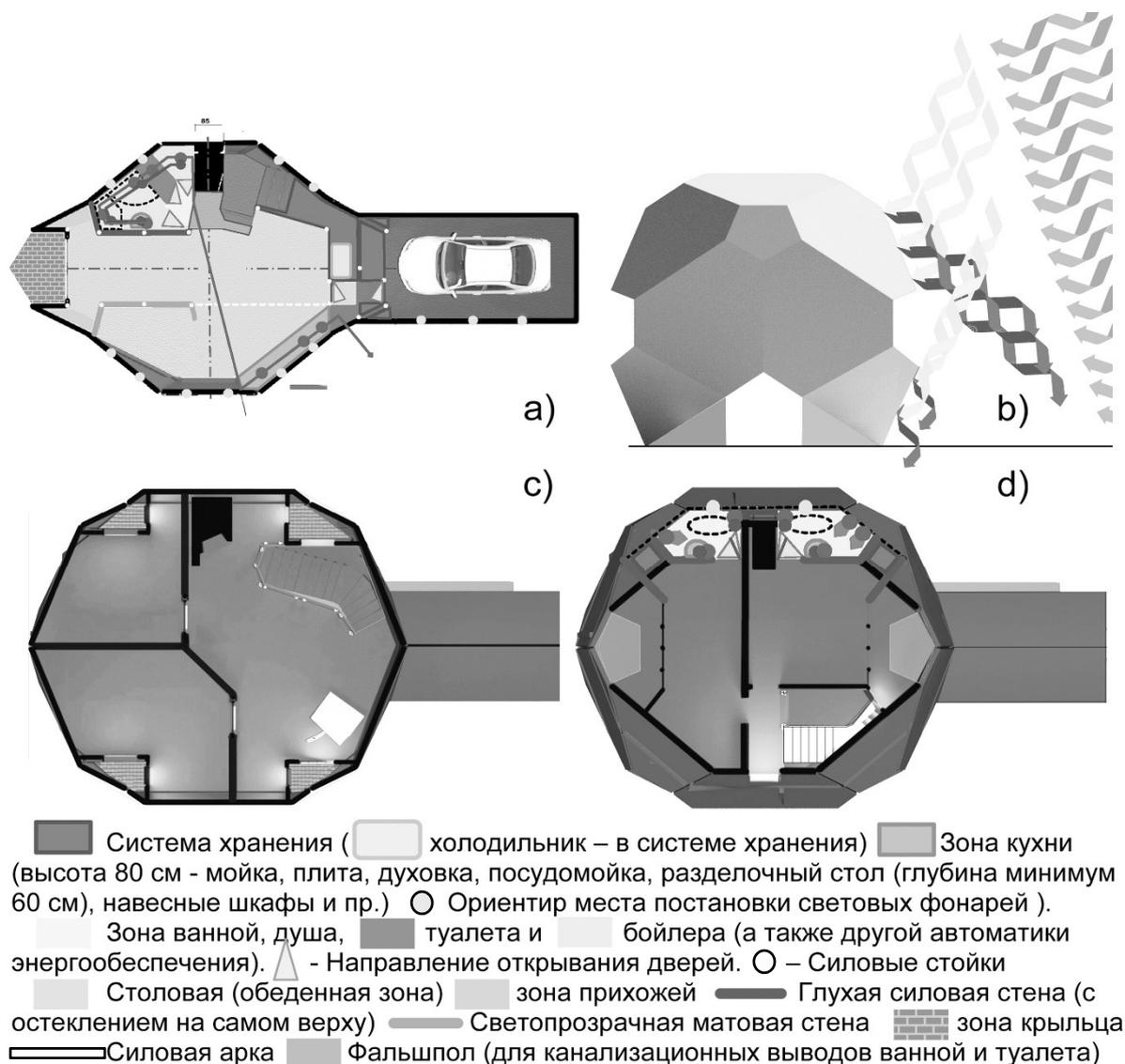


Рис. 6. Поэтажная планировка: а) 1-й этаж (длина метки - 1м); б) «геометрическая солнцезащита» стен и световых проемов; с) 2-й этаж – каминный зал; d) мансарда с навесами крыши над балконами.

Возможность применения промышленных способов строительства с высокой степенью префабрикации (заводской готовности) и с контролем качества элементов конструкции на производстве получает дальнейшее развитие благодаря шарнирным соединениям панелей.

На рис. 7 представлена схема предварительной сборки элементов для транспортировки комплекта для крупноузловой сборки, упрощающая логистику и перевозку, а также способ быстрого монтажа и быстрого

возведения оболочки всего здания: в фабричных условиях выполняется изготовление и попарная сборка 22 панелей на неразъемные шарниры (рис 7 а)). Все 11 «пакетов» из двух стеновых панелей (3,6х3,6м и 3,6*4,4м) можно погрузить в один полуприцеп ТИР и перевезти к месту монтажа. Вес всего комплекта крупноузловой сборки оболочки геокупола из SIP-панелей толщиной 20 см вместе с шарнирами не превышает $\approx 5 \div 6$ т.

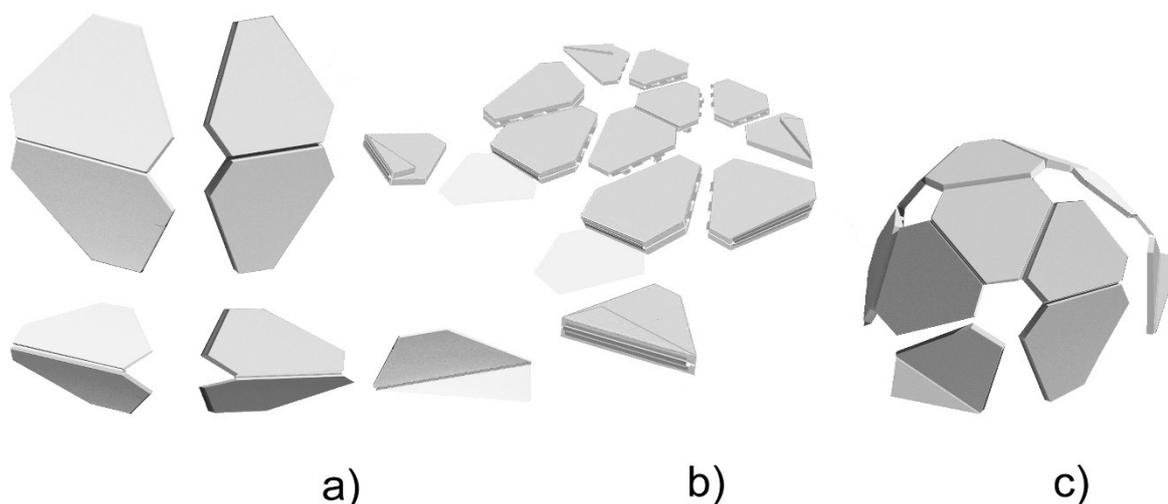


Рис. 7. Схема предварительной сборки элементов и быстрого возведения оболочки всего здания: а) «пакеты» сборок; б) подготовка на месте строительства; в) схема сведения углов и замыкания оболочки овоида.

На горизонтальной поверхности на стапеле к 1-й сборке (верхние панели) стыкуются еще 8 парныхборок на заранее смонтированные разъемные шарниры (рис. 7 б)). За центральную сборку все детали поднимаются вверх, шарнирно соединенные сборки под действием веса «раскрываются», затем сводятся углы панелей и фиксируются разъемы шарниров; 2 замыкающие пары подводятся отдельно и также фиксируются (рис. 7 в)). Затем вся конструкция опускается на основание, крепится к фундаменту, после чего все панели жестко заневоливаются вдоль ребер, а стыки панелей заделываются.

Выводы. Представленная концепция и проектное предложение быстровозводимого энергоэффективного дома в виде овоидного геокупола из несущих теплоизолирующих конструктивных панелей из унифицированных элементов увеличенного размера с малоотходным раскроем стеновых материалов обеспечивают экономичность при строительстве и дальнейшей эксплуатации здания, рациональность конструкции и планировки здания в виде компактной жесткой энергоэффективной геометрической формы.

Компактное размещение коммуникаций и экономное решение всех инженерных систем (отопление и вентиляция, подача воды, канализация, электроснабжение...) также снижает общую стоимость строительства, трудоемкость и сроки строительства. Применение естественного освещения

поддержано "геометрической солнцезащитой" от летнего перегрева самой формой здания в виде овоидного геокупола из-за «отрицательного» наклона стен и применения балконных «козырьков».

Широкое разнообразие возможных применяемых материалов и множество конструктивных решений для теплоизолирующих несущих стеновых панелей (что существенно расширяет круг возможных предприятий-изготовителей) дополняется преимуществами максимальной префабрикации элементов с минимальными отходами и с заводским контролем качества. Отказ от отдельного каркаса и жестких соединителей и применение установленных в заводских условиях разъемных и неразъемных поворотных шарниров обеспечивают быстровозводимость здания, упрощение логистики, легкость транспортировки и сокращение сроков монтажа, а малый вес оболочки здания позволяет использовать экономичный облегченный фундамент.

Развитие представленного подхода и опыт, полученный при реализации данного проекта, позволит найти и другие решения для несущих конструкций энергоэффективной компактной овоидной или эллипсоидной формы с малоотходным раскроем стеновых материалов для быстровозводимого индивидуального жилья и других типов зданий.

Автор признателен выпускнику КНУСА И. Давыдову за помощь в проведении 3D-моделирования для данного проекта.

Литература

1. *Беленя Е.И., Гениев А.Н., Балдин В.А.* Купольные покрытия. – В кн.: Металлические конструкции. Учеб. для вузов / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1976.

2. *Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедева Н.В. и др.* Купола ребристые, сетчатые и панельные. – В кн.: Инженерные конструкции. Учеб. для вузов по спец. "Архитектура" / Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Высш. шк., 1991.

3. *Савельев В.А.* Металлические купола. – В кн.: Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник / Под ред. Ю.А. Дыховичного, Э.В. Жуковского. – М.: Высш. шк., 1991.

4. *Гохарь-Хармандарян И.Г.* Большепролетные купольные здания. – М.: Стройиздат, 1972. – 150 с.

5. *Сиянов А.И.* Численные исследования металлических ребристо-кольцевых куполов. - В кн.: Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 2, 2008 р. – Вінниця: Вінницький національний технічний університет, Україна, 2008 г.

ОВОЇДНИЙ ГЕОКУПОЛ ІЗ ЗБІЛЬШЕНИМИ НЕСУЧИМИ СТІНОВИМИ ПАНЕЛЯМИ

С. М. Шовкопляс

Надається концепція та проектна пропозиція швидко-монтажного енергоефективного будинку у вигляді овоїдного геокуполу з несучих теплоізованих конструкційних панелей з уніфікованих елементів збільшеного розміру з маловідходним розкромом стінових матеріалів. Показані особливості геометрії та конструкції, широка уніфікація стінових несучих панелей, можливість застосування промислових методів будівництва з високим рівнем префабрикації (заводської готовності) елементів оболонки будівлі, наданий опис схем попереднього складання елементів та транспортування комплекту для великовузлового монтування, а також спосіб швидкого монтажу та спорудження оболонки всієї будівлі. Показані незалежність конструктивного рішення щодо виготовлення теплоізованих конструкційних стінових несучих панелей та їх товщини, що збільшує коло можливих підприємств-виробників. Також показані особливості геометрії будівлі для досягнення захисту від сонця та збільшення частки тепла від сонячних променів в холодний сезон року одночасно з високим рівнем природнього освітлення приміщень будівлі.

THE OVOID GEODESIC CUPOLA WITH INCREASED STRUCTURAL WALL PANELS

S. Shovkoplyas

The concept and project proposal of quick-mounting (rapidly erected) building in form of ovoid geodesic cupola made of structural insulated panels from uniform elements with increased dimensions with low-waste layout of workpieces are presented. The features of geometry and design are shown as well as the possibility of using of low-cost industrial methods of buildings with high level of prefabrication of details of building's envelope, the high level of unification of its elements with low-waste layout of workpieces, the schemes of preliminary assembly operation and transportation of kit for semi-knocked down assembly are shown also as well as the method of quick montage (rapidly erection) of building in whole. The independence of design and thickness of structural wall details from geometry of ovoid geodesic cupola is shown; these features give a wide possibility to use a different technical solutions for manufacturing of the structural insulated panels for enlarge a number of involved manufacturing plants. The features of geometry for solar shading and increasing of solar gain with high level of usage of natural lighting in the building are shown also.