

«Шагающий замок»: концепция шагающего дома-купола на 4 ногах

Стадия: концепт / технико-экономическая проработка. Все числа ниже получены по упрощённым формулам и служат для выбора схемы и класса комплектующих. Это не рабочий расчёт. Каркас, раму ног, колонну и узлы нужно потом проверить в FEM (FreeCAD FEM / ANSYS) и подобрать комплектующие по каталогам производителей.

Расчёт воспроизводится скриптом: `calc/calc.py` берёт массы и центры масс из модели (`cad/mass_*.json`) и записывает результаты в `calc/results.json`, а рисунки в `renders/`.

1. Итог в одном абзаце

Рекомендую **схему В: «шагающий экскаватор»**. Это 4 ноги на общей подвижной раме и центральная опорная плита Ø2,0 м под колонной. Плита стоит на опорно-поворотном устройстве (ОПУ). - **Приводов всего 6**. У каждой ноги 1 привод подъёма, ход 300 мм. Общих приводов два: 1 челночный (ход 600 мм) и 1 привод поворота ОПУ. - **Устойчивость**. Дом всё время стоит либо на 4 ногах, либо на плите Ø2 м. На трёх ногах он не стоит никогда. - **Скорость**: 0,92 м/мин (шаг 600 мм за 39 с). - **Поворот**: на месте на любой угол. - **Нивелирование**: подъёмными приводами ног.

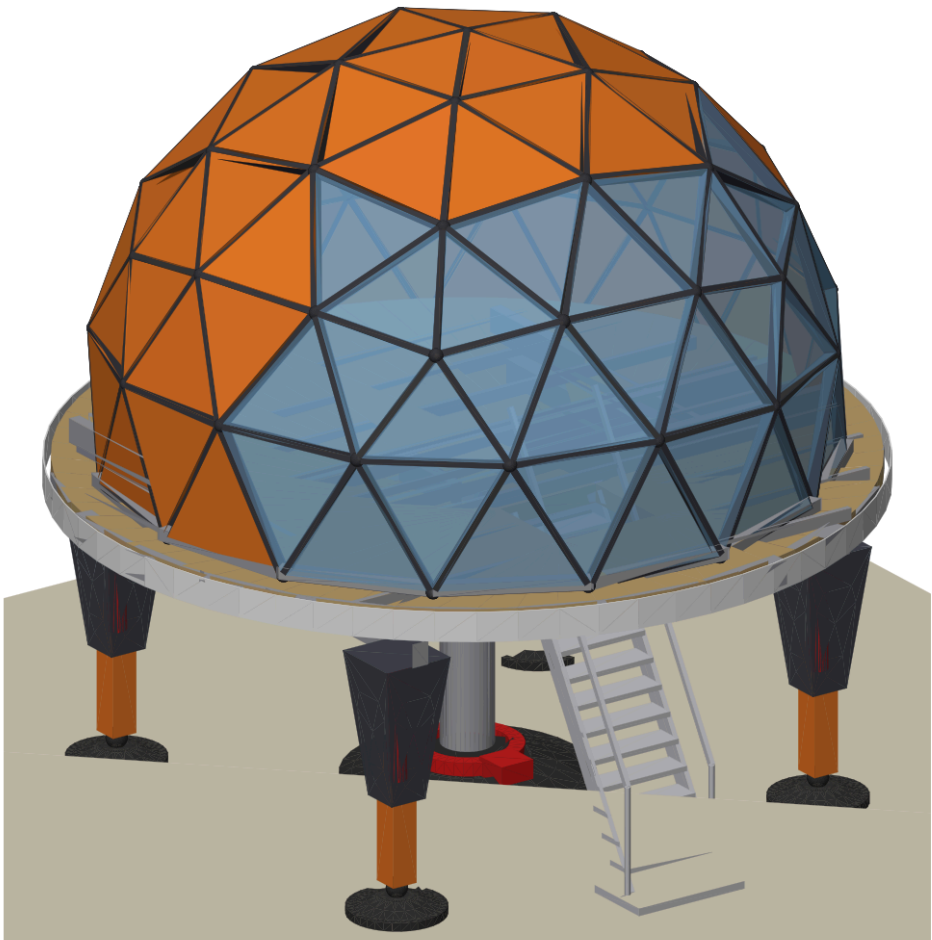
Схема А, предложенная изначально (у каждой ноги свой подъём и свой ход, всего 8 приводов), работоспособна. Но у неё вдвое меньше скорость (0,47 м/мин) и маленький запас устойчивости на трёх ногах: 113 мм. Порядок «перенести 4 ноги, потом сдвинуть корпус» вообще **неустойчив**: ЦТ выходит из опорного треугольника на 217 мм. Подробнее в разделе 3.

Рекомендуемый привод: **электромеханический** (серводвигатель или асинхронник с ПЧ и тормозом, винтовая передача ШВП или ПРВП, либо винтовой домкрат 10 т). Обоснование и гидравлическая альтернатива — в разделе 6.

Параметр	Значение
Купол	геодезический 3V, срез 5/8. Сфера Ø6,0 м, основание Ø5,91 м, высота над полом 3,56 м
Каркас купола	165 стержней, труба 100×50×2, всего 198 м
Ограждение	105 треугольных панелей: 74 глухих сэндвича «сталь 0,7 + XPS (Пеноплэкс) 100 + фанера 12» (46 м²) и 31 стеклопакет (19 м², передний сектор ±65°)
Платформа	кольцевая, Ø6,6 м. Рама пола 200 мм, пол (чистовой) на отметке +2,76 м
Просвет под домом	≈2,1 м под рамой ног, ≈2,45 м под рамой пола (машина помещается, как на фото)
Общая высота	6,3 м
Масса	конструкция с интерьером ≈11,3 т; при ходьбе с 4 людьми ≈11,6 т (W = 113 кН); на стоянке со снегом ≈16,8 т
Опоры	4 ноги в плане 3,8 × 4,0 м (по осям), подпятники Ø800 на шаровой опоре; плита Ø2,0 м

Параметр	Значение
Приводы (схема В)	4 подъёмных (60 кН динамика / 100 кН статика, ход 300, 15...40 мм/с), 1 челночный (15 кН, ход 600, 40...75 мм/с), 1 поворотный (ОПУ ≈Ø0,9 м, опрокидывающий момент ≥66 кН·м)
Скорость	0,92 м/мин в базовой настройке. До ~1,3 м/мин при шаге 800 мм и более быстром челноке
Мощность	пик ≈3 кВт (4 подъёма одновременно) + 0,4 кВт (челнок); ввод 380 В / 7-10 кВА или АКБ. Энергия ≈0,9 кВт·ч на 100 м

Шагающий замок, схема В (рекомендуемая): стоянка на 4 ногах, лестница разложена



Купол 3V 5/8, Ø6.0 м, стенка 100 мм; платформа Ø6.6 м; 4 ноги на подвижной раме + центральная плита Ø2.0 м

2. Исходные данные и допущения

- Геометрия как на фото Capsule Castle: купол на кольцевой платформе, 4 наклонные конические ноги, складная лестница снизу. Наклонный вид ног в модели сохранён (сварная усечённая пирамида). Сам подъёмный телескоп внутри ноги стоит **вертикально**, поэтому привод работает только на сжатие, без изгиба.
- Стенка 100 мм: стержни каркаса 100×50 мм, Пеноплэкс 100 мм уложен между ними, заподлицо.
- Удельные массы:
- глухая панель 18,2 кг/м² (сталь 0,7 мм 5,5 + XPS 100 мм при 35 кг/м³ 3,5 + фанера 12 мм 7,2 + крепёж и плёнки 2);
- стеклопакет 6-16-6 (закалённое стекло или триплекс) с рамкой 35 кг/м²;

- пол 39 кг/м² (XPS 100 + фанера 2×18 + финиш + нижняя обшивка 1 мм);
- сталь 7850 кг/м³; профильные трубы считаются по ГОСТ-сечению: $A = 2t(h+b) - 4t^2$.
- Интерьер и инженерия: 1500 кг на высоте +0,8 м над полом. Люди при ходьбе: 4 × 80 кг. На сварку, крепёж и окраску добавлено +5% от массы стали.
- Снег: III снеговой район, $S_g = 1,5$ кПа, $\mu = 1$ (с запасом) на план Ø6,6 м, всего 5,2 т.
При снеге не ходим: снег учтён только для стоянки.
- Ветер: $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$, $\rho = 1,225$ кг/м³. Купол: $C_f = 0,6$ на проекцию 17,5 м². Платформа, ноги и колонна: $C_f = 1,5$. Итого $C_f \cdot A \approx 20,6$ м², плечо $\approx 2,95$ м над грунтом.

2.1 Масса (из модели FreeCAD + добавки)

Группа	кг
Купол: каркас (стержни + узлы + опорное кольцо)	1238
Купол: сэндвич-панели	837
Купол: остекление	668
Пол: стальная рама (кольцо 200×150×5, балки 200×100×6, лаги 100×50×3)	1512
Пол: сэндвич-настил + облицовка торца	1359
Ходовая: ноги, телескопы, подпятники, рама ног, направляющие, каретки	2347
Приводы (4 подъёма + челнок)	415
Центральная опора: колонна Ø426×8, подкосы, ОПУ, плита Ø2,0 м	899
Лестница	170
Сварка, крепёж, окраска (+5%)	308
Интерьер и инженерия	1500
Собственный вес	11 253
Люди при ходьбе	320
Рабочая масса при ходьбе, W	11 573 кг = 113,5 кН
Снег на стоянке	5 231
Стоянка со снегом	16 804 кг = 165 кН

Центр тяжести при ходьбе: $X \approx +80$ мм (смещён вперёд, к остеклению), $Z \approx 2,76$ м над грунтом.

Резерв облегчения $\approx 1,5\text{--}2$ т: деревянный клеёный или алюминиевый каркас купола (как в интерьере на фото), стержни 100×40×2, более лёгкий пол. Рама пола и ходовая так или иначе останутся стальными.

3. Выбор кинематики

3.1 Рассмотренные варианты

Схема	Приводов	Устойчивость	Скорость (шаг 600)	Плюсы	Минусы
А: 4 ноги × (подъём + ход)	8	3 ноги, запас 113 мм	0,47 м/мин	Нет «пятой опоры», хорошо идёт по неровному грунту, «настоящая» ходьба	8 приводов; малый запас устойчивости; поворот только дифференциальным шагом с боковым люфтом кареток; сложное управление
А, порядок «4 переноса, потом корпус»	8	неустойчиво (–217 мм)	—	—	ЦТ выходит из треугольника опор
Двухрамная: внутренняя рама 4 ноги + внешняя 4 ноги + 1-2 горизонтальных привода	9-10	всегда 4 ноги	≈1 м/мин	Максимальная устойчивость	8 ног (противоречит ТЗ), больше всего приводов
В (рекомендуемая): 4 ноги на общей раме + центральная плита (как шагающий экскаватор ЭШ)	6 (5 без поворота)	4 ноги или плита Ø2 м (запас ≥690 мм)	0,92 м/мин	1 привод на ногу; простое управление (4 синхронные оси Z + X + C); поворот на месте на любой угол; низкие давления на грунт	Под домом центральная колонна; во время фазы «на плите» корпус наклоняется вместе с грунтом под плитой, поэтому трассу нужно спланировать (уклон ≤3%)
Механизм Кланна/Янсена, 1 мотор на ногу	4	для 4 ног статически неустойчиво (нужно ≥6 ног)	—	Минимум приводов	Нет нивелирования, нет устойчивости

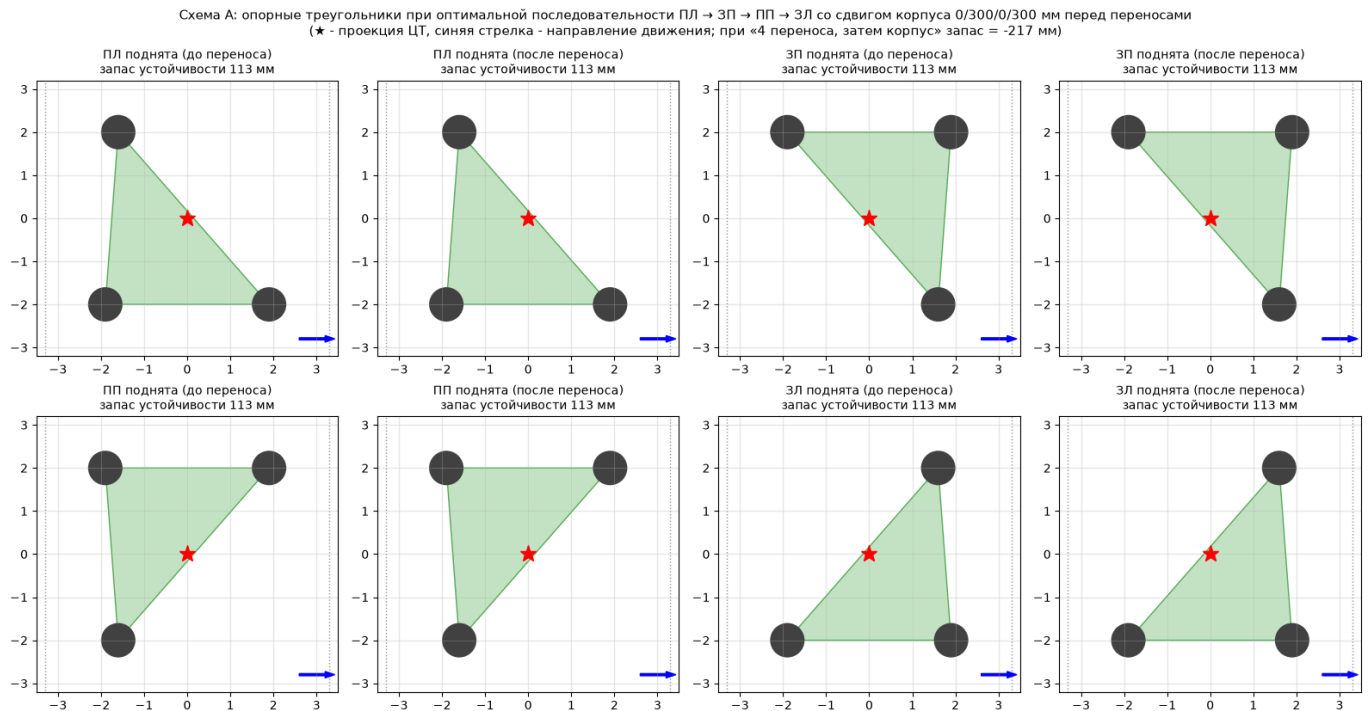
3.2 Почему исходная схема А слабее

У 4 ног, стоящих прямоугольником, диагональ проходит через центр. Поднимаем одну ногу и получаем треугольник опоры, гипотенуза которого лежит почти через ЦТ. Положительный запас бывает, только если остальные ноги смещены по ходу удачно. Перебором всех 24 последовательностей и сдвигов корпуса (скрипт `calc.py`) получено:

- «Переносим 4 ноги, затем все 4 ходовых привода одновременно двигают корпус»: запас **–217 мм**, дом опрокидывается при переносе передней ноги.
- Лучший порядок: **сдвиг корпуса S/2 → ЗП → ПП → сдвиг корпуса S/2 → ЗЛ → ПЛ** (задняя нога, затем передняя нога той же стороны). Запас **113 мм** во всех 8 фазах. Формула: запас $\approx (S/4) \cdot 2b / \sqrt{((2a - S/2)^2 + (2b)^2)}$. Обозначения: S — шаг, 2a × 2b — база ног.
- 113 мм для дома массой 10,5 т с ЦТ на высоте 3 м означают следующее:
- наклон грунта 2° сдвигает ЦТ на ≈100 мм;
- двое людей, перешедших к стене, сдвигают ЦТ на ≈40 мм;

- ветер 12,5 м/с съедает половину запаса.

Работать можно, но это «на грани». Запас можно увеличить: * удлинить шаг (800 мм дают ≈ 150 мм запаса); * наклонить корпус подъёмными приводами на $1,5-2^\circ$ в сторону опорного треугольника, что даёт ещё $\approx 80-100$ мм. Но это ощутимо внутри дома. * Максимальная реакция одной ноги на трёх опорах $\approx W/2 = 52-57$ кН, поэтому подъёмный привод нужен на 80 кН.

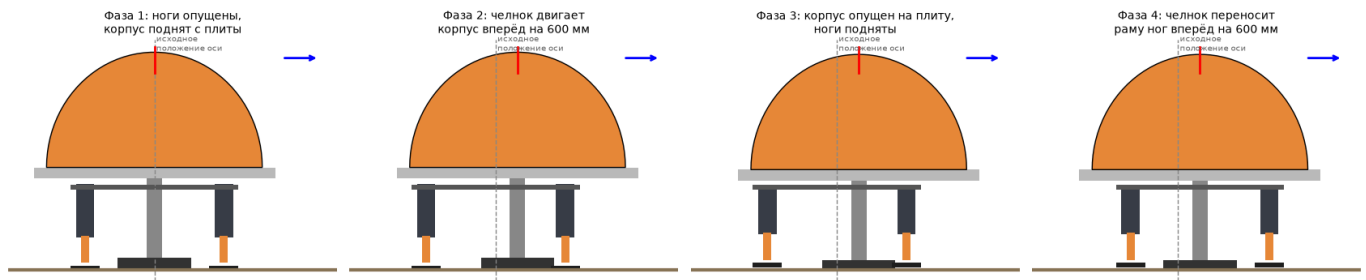


3.3 Схема В: как она ходит

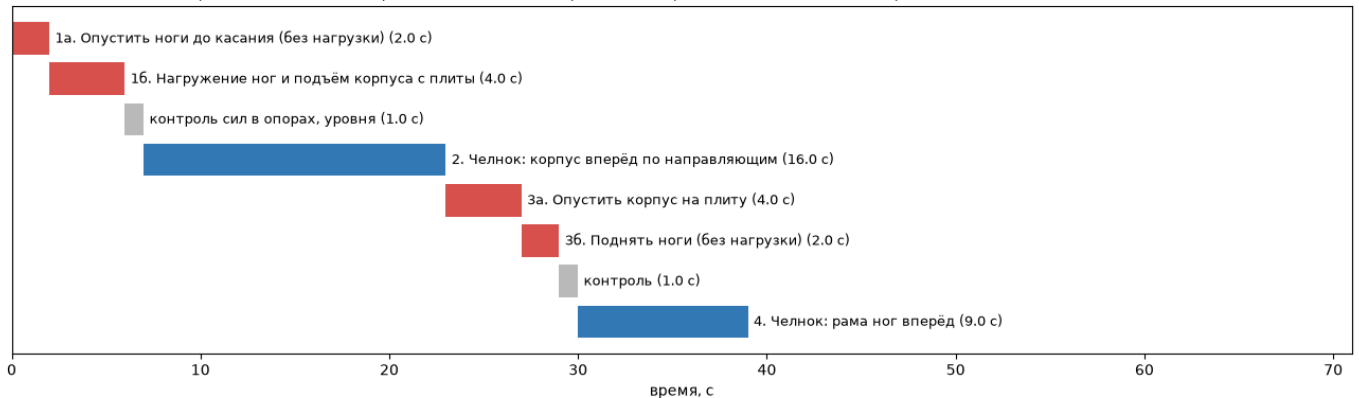
Корпус (купол + платформа + колонна с плитой) и рама ног соединены двумя линейными направляющими по оси X, на осях $Y = \pm 2,0$ м. Каретки стоят прямо над ногами, поэтому вертикальная нагрузка идёт по прямой. Челночный привод (1 шт.) двигает раму ног относительно корпуса на ± 300 мм.

Фаза	Что происходит	Опора	Время, с
1а	Ноги опускаются до касания грунта, без нагрузки, 80 мм при 40 мм/с	плита	2,0
1б	Ноги нагружаются и поднимают корпус: плита отрывается на 60 мм при 15 мм/с. Нивелирование по инклинометру	4 ноги	4,0
—	Контроль сил в 4 опорах и уровня	4 ноги	1,0
2	Челнок двигает корпус вперёд на 600 мм при 40 мм/с	4 ноги	16,0
3а	Корпус опускается на плиту, 60 мм при 15 мм/с	4 ноги → плита	4,0
3б	Ноги поднимаются на 80 мм при 40 мм/с	плита	2,0
—	Контроль: сила на плите $\approx W$	плита	1,0
4	Челнок переносит раму ног вперёд на 600 мм при 75 мм/с	плита	9,0
	Итого за шаг 600 мм		39 с → 0,92 м/мин

Схема В (рекомендуемая): цикл шага 600 мм ≈ 39 с $\rightarrow 0.92$ м/мин. Всегда опора на 4 ноги ИЛИ на плиту $\varnothing 2.0$ м

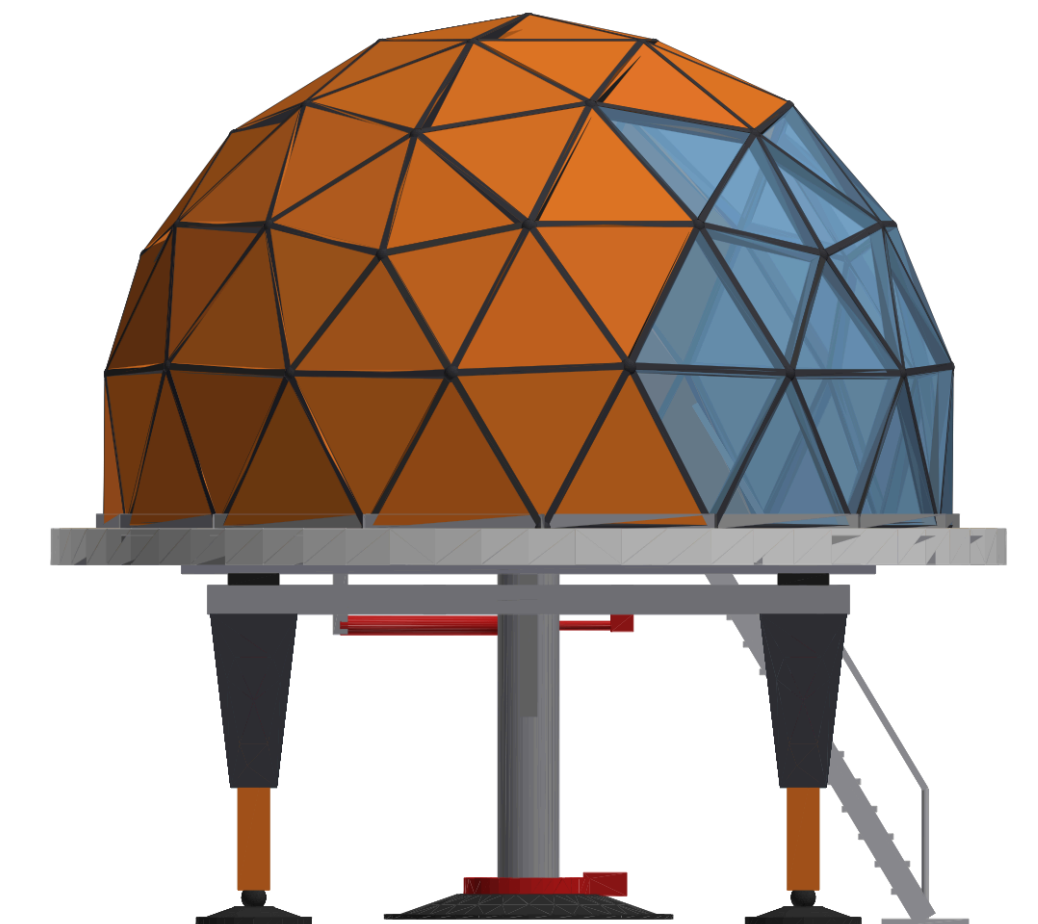


Циклограмма шага схемы В: красное - 4 подъёмных привода (синхронно), синее - челночный привод. Итого 39 с на 600 мм = 0.92 м/мин



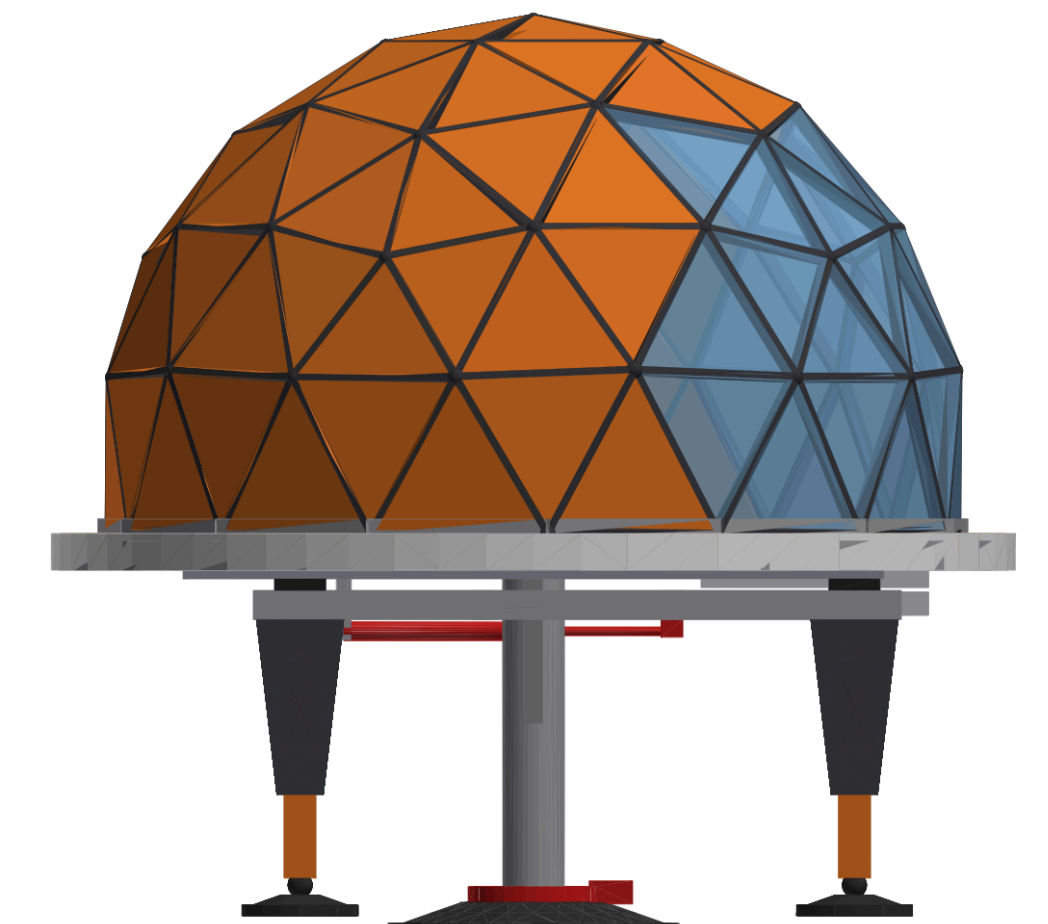
- **Поворот.** В фазе «на плите» (ноги подняты) привод ОПУ поворачивает корпус вместе с рамой ног вокруг оси плиты. Скорость $\approx 0.5^\circ/\text{с}$, угол любой. Ноги описывают окружность $R \approx 3.4$ м, это место должно быть свободно.
- **Ход назад:** тот же цикл в обратном порядке.
- **Нивелирование.** На ногах 4 подъёмных привода выставляют корпус в горизонт по инклинометру. Резерв хода: $300 - 60 - 80 \approx 160$ мм, то есть ± 80 мм на базе 3,8–4 м, примерно $\pm 1.2^\circ$. На плите корпус наклоняется вместе с грунтом под плитой, поэтому трасса нужна с уклоном $\leq 3\%$ и подготовленная: щебень или уплотнённый грунт, полоса ≈ 4.8 м. Если грунт сложнее, увеличить ход до 400–500 мм.
- **Стоянка:** дом стоит на 4 ногах **и** на плите (5 опор), ноги поджаты до заданного усилия, винты на тормозе и механическом стопоре. Так дом переносит снег и шторм, а приводы не нагружены постоянно.

Схема В, вид сбоку (вперёд = вправо): корпус на ногах, плита поднята на 60 мм



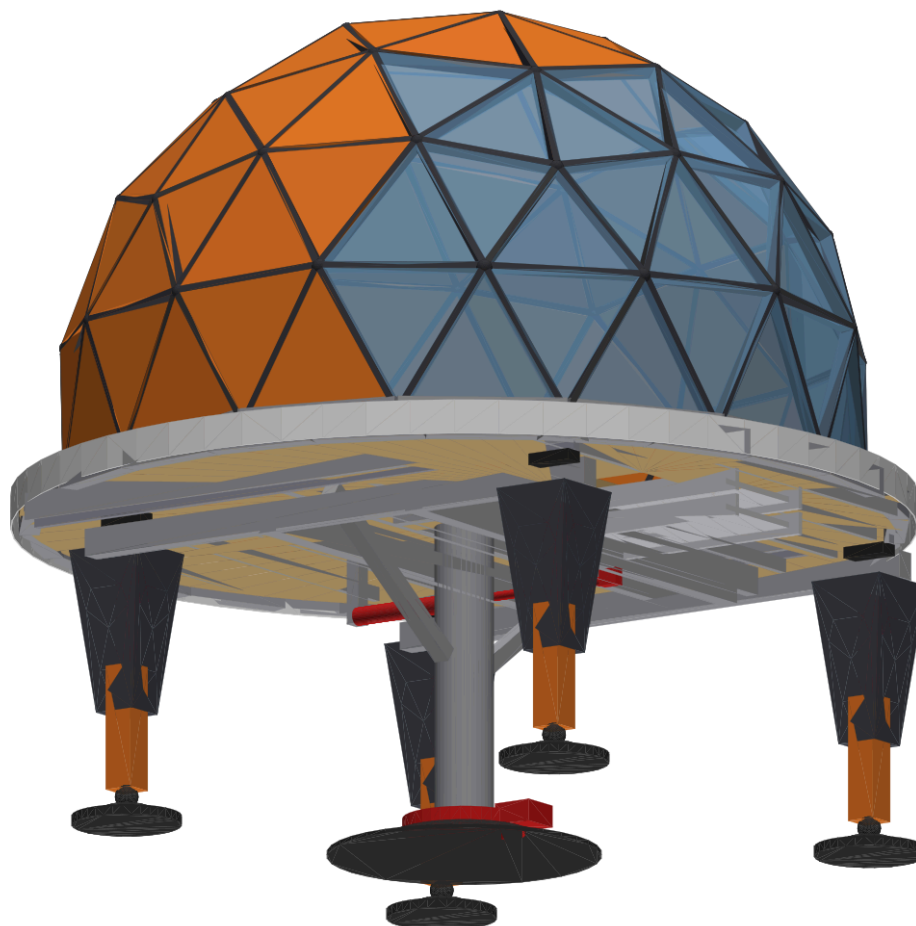
Фаза 1-2: ноги несут корпус, челночный привод двигает корпус вперёд на 600 мм

Схема В, вид сбоку: корпус опущен на плиту, ноги подняты на 80 мм и вынесены вперёд на 300 мм



Фаза 3-4: корпус стоит на центральной плите, рама ног переносится вперёд (лестница сложена)

Схема В, ракурс снизу: рама ног, направляющие, челночный привод, колонна, ОПУ и плита



Красное - приводы: 4 подъёма ног + 1 челночный + 1 поворот (ОПУ) = 6 шт

4. Нагрузки на опоры, грунт и устойчивость

4.1 Схема В

Случай	Формула	Нагрузка
Нога, 4 опоры, номинал	$W/4$	28,4 кН
Нога, 4 опоры, неравномерность $k = 1,3$ (регулирование по датчикам силы)	$1,3 \cdot W/4$	36,9 кН
Нога, авария регулирования: опора на 2 диагональные ноги	$W/2$	56,8 кН → номинал привода 60 кН
Нога, стоянка со снегом (без плиты)	$1,3 \cdot 165/4$	53,6 кН → статика привода ≥100 кН ($k \approx 1,9$)
Плита	W	113,5 кН

Давление на грунт, $p = F/A$:

Опора	Режим	Давление
Подпятник Ø800 (0,50 м²)	номинал	73 кПа
Подпятник Ø800	худший случай	113 кПа

Опора	Режим	Давление
Подпятник Ø800	снег	107 кПа
Плита Ø2,0 (3,14 м²)	—	36 кПа

Ориентиры несущей способности: уплотнённый щебень или песок 150–250 кПа, суглинок 100–150 кПа, слабый влажный грунт 50 кПа. На слабом грунте нужны съёмные «лыжи» 1×1 м или дорожные плиты по трассе.

Устойчивость. Сила ветра $F = q \cdot C_f \cdot A$, опрокидывающий момент $M = F \cdot 2,95 \text{ м}$:

Ветер	q	F	M
10 м/с	61 Па	1,3 кН	3,7 кН·м
15 м/с	138 Па	2,9 кН	8,4 кН·м
30 м/с (стоянка)	551 Па	11,4 кН	33,6 кН·м

- Стоянка на 4 ногах: удерживающий момент = собственный вес × min(a, b) = 110 × 1,9 ≈210 кН·м. При 30 м/с коэффициент запаса **K = 6,2**. Отсос на куполе не учтён: для штормового района рекомендуются анкеры (винтовые сваи) под подпятники.
- Фаза «на плите»: удерживающий момент = W·(R_плиты – e), где e = 0,17 + 2,7·tg3° ≈0,31 м (смещение ЦТ плюс уклон 3°). Получается ≈78 кН·м. При 15 м/с **K = 9,3**.
- Фаза «на ногах»: опорный прямоугольник 3,8×4,0 м, запас ≥1,8 м.
- **Ограничение для ходьбы:** ветер до 12 м/с, в порывах до 15 м/с (по анемометру, с блокировкой). Схема А при 10 м/с имеет K = 3,1, предел около 12,5 м/с.
- Инерция: разгон 0 → 40 мм/с за 0,5 с даёт a = 0,08 м/с² и F = 0,9 кН. Это ничтожно по сравнению с ветром.

4.2 Конструктивные замечания (концептуально)

- **Главные балки пола 200×100×6** при пролёте между каретками 3,8 м: $\sigma \approx M/W \approx 26,7 \text{ кН·м} / 179 \text{ см}^3 \approx 150 \text{ МПа}$. Рекомендую **250×150×8** или ферму высотой 300–400 мм.
- **Фаза «на плите»: весь корпус висит на колонне.** Нужна «капитель» с подкосами. В модели показаны 2 подкоса в плоскости YZ. В плоскости XZ ходит рама ног, поэтому там подкосы должны идти выше рамы ног, либо нужна жёсткая ступица 1,2×1,2 м.
- Плита Ø2,0 м: лист 12 мм с радиальными рёбрами, внизу резиновый или полимерный «башмак» от скольжения.
- ОПУ: шариковое 4-точечное (как у кранов-манипуляторов), диаметр по дорожке ≈0,8–0,9 м, опрокидывающий момент ≥66 кН·м (1,5 × 43,8). Привод — мотор-редуктор с шестернёй по зубчатому венцу.

5. Приводы: усилия, ходы, скорости, мощность

Привод	Кол-во	Усилие (ном. / макс.)	Ход	Скорость	Мощность
Подъём ноги (В)	4	37 / 60 кН, статика 100 кН	300 мм	15 мм/с под нагрузкой, 40 мм/с без нагрузки	0,74 кВт полезная → серво 2–3 кВт с тормозом

Привод	Кол-во	Усилие (ном. / макс.)	Ход	Скорость	Мощность
Челнок (В)	1	8 / 15 кН	600 мм	40-75 мм/с	0,43 кВт → 1-1,5 кВт
Поворот ОПУ (В)	1	≈0,6 кН·м (трение) + запас по ветру → привод 3-5 кН·м	360°	≈0,5°/с	0,5-0,75 кВт
Подъём ноги (А)	4	52 / 80 кН	300 мм	как В	серво 3 кВт
Шаговый привод (А)	4	8 / 10 кН	600 мм	100 мм/с	1 кВт

Как получены цифры: * Челнок: $F = W \cdot (\mu_{\text{направляющих}} + i) + F_{\text{ветра}} = 113,5 \cdot (0,01 + 0,05) + 1,3 \approx 8 \text{ кН}$. Здесь $i = 5\%$ — уклон с запасом. * Подъём, винт ШВП с шагом 10 мм: $M_{\text{винта}} = F \cdot P / (2\pi \cdot \eta) = 60\,000 \cdot 0,010 / (2\pi \cdot 0,9) \approx 106 \text{ Н·м}$. Через редуктор $i = 5$ на мотор приходится $\approx 22 \text{ Н·м}$ пиково и $\approx 14 \text{ Н·м}$ номинально, 1200 об/мин. * Ресурс ШВП с $C_a \approx 100 \text{ кН}$: $L_{10} = (C_a / F_m)^3 \cdot 10^6 \text{ об}$. При $F_m = 37 \text{ кН}$ это $\approx 20 \cdot 10^6 \text{ об}$, то есть порядка 1000 км хода. Ресурс с огромным запасом. * Энергия за шаг 600 мм: $(W \cdot 0,06 \text{ м} + F_{\text{челн}} \cdot 0,6 \text{ м}) / 0,6 \approx 19 \text{ кДж}$, то есть **≈0,9 кВт·ч на 100 м**.

Тип винта. * **ПРВП (планетарная роликовая винтовая передача).** Лучше всего подходит для подъёма. Статическая грузоподъёмность в 2-3 раза выше, чем у ШВП того же диаметра, хорошо держит удар и длительную статическую нагрузку (нет бринеллирования дорожек). Ориентир: Ø36-48 × 5-10, $C_a \approx 130-200 \text{ кН}$. Это класс электроцилиндров Exlar FTX, Tolomatic RSX, Ewellix (SKF) SRSA и аналоги; конкретную модель проверить по каталогу. Минус: цена в 2-3 раза выше, чем у ШВП. * **ШВП.** Ø50-63 × 10, $C_a \approx 80-110 \text{ кН}$ (проверить по каталогу). Дешевле, но на стоянке обязательно разгружать: тормоз, стопор и опора на плиту. * **Бюджетный и «цеховой» вариант: винтовой домкрат 10 т** (червячный редуктор + винт) из каталога подъёмного оборудования, например ZIMM Z, Pfaff-silberblau SHE или китайские серии 10 т. Варианты: * **трапецеидальный винт — самотормозящийся:** стоянка без тормоза, нет проблем с бринеллированием. КПД $\approx 25-30\%$, поэтому мотор $\approx 2,2-3 \text{ кВт}$ на ногу. Скорость 1-2,5 м/мин подходит под наши 15-40 мм/с; * **ШВП** в том же корпусе: КПД $\approx 70\%$, нужен тормоз.

Для мастерской с ЧПУ и сваркой это проще всего: домкрат встраивается в сварную ногу, телескоп воспринимает изгиб, домкрат работает только на осевую силу.

Рекомендация по подъёму (В): домкрат 10 т с ШВП или ПРВП-электроцилиндр 60-100 кН. В обоих случаях: мотор с тормозом, абсолютный энкодер, тензодатчик в подпятнике, механический стопор на стоянке. **Челнок:** ШВП Ø32-40 × 20 или рейка-шестерня, 15-20 кН.

6. Электромеханика или гидравлика

Критерий	Электромеханика (серво + винт)	Гидравлика
Подъёмный цилиндр	см. раздел 5	Ø80/45: при 160 бар 80 кН, рабочее давление $\approx 73 \text{ бар}$
Насос / мощность	4×2...3 кВт серво	18 л/мин под нагрузкой, 33 л/мин при подъёме ног; насос $\approx 4 \text{ кВт}$ +

Критерий	Электромеханика (серво + винт)	Гидравлика
		аккумулятор
Шум в жилом доме	тихо	насосная станция шумит, нужна шумоизоляция
Синхронизация 4 ног, позиционирование	точно, «как ЧПУ», с электронным редуктором	нужны пропорциональные распределители, датчики положения в цилиндрах, компенсация утечек
Удержание нагрузки	тормоз + стопор (у трапецеидального домкрата — самоторможение)	гидрозамки и тормозные клапаны; ползучесть со временем
Мороз -30°C	без проблем	зимнее масло, подогрев бака
Экология / пожар	нет масла	утечки масла под жилым домом, РВД
Ударные нагрузки, перегрузка	нужен запас по C_0 (ПРВП)	хорошо, есть предохранительный клапан
Стоимость	приводы дороже	цилиндры дешёвые, но гидросхема для 5 осей не дешевле
Обслуживание	минимум	фильтры, масло, РВД

Рекомендация: электромеханика. Нагрузки умеренные (≤ 60 кН на ногу), скорости малые, нужны тихая работа, точная синхронизация 4 осей и долгое удержание на стоянке, а работать придётся в российскую зиму. Гидравлику имеет смысл брать, только если дом вырастет до 20+ т или станет проблемой ударная перегрузка. Компромисс — **электрогидравлические моноблоки (ЕНА)**: свой насос на каждую ногу, без общих магистралей.

7. Управление и безопасность

- **Контроллер.** Подойдёт любой из вариантов:
- ПЛК с motion-функциями (CODESYS + EtherCAT-сервоприводы);
- **LinuxCNC** с платами Mesa: оси Z1–Z4 (ноги), X (челнок), C (поворот). Цикл шага пишется как G-код или HAL-машина состояний.
- **Датчики:**
- в каждом подпятнике тензодатчик 10 т (или тензомост на телескопе) и концевик касания; на плите — датчик силы и касания;
- 2-осевой инклинометр на раме пола (точность $0,05^{\circ}$), ограничение крена $1,5^{\circ} \rightarrow$ стоп;
- абсолютные энкодеры, концевики и «жёсткие упоры» на всех осях;
- анемометр (блокировка ходьбы при >12 м/с);
- датчик «лестница сложена», датчик закрытой двери;
- лидар или УЗ-датчики препятствий по периметру и в зоне выноса ног.
- **Регулирование ног:** гибридная позиция/сила. После касания нога догружается до $W/4 \pm 10\%$, затем 4 оси двигаются синхронно с выравниванием сил. Для схемы А это обязательно: при отказе датчика силы дом встаёт на 2 диагональные ноги.
- **Машина состояний** с проверками перед каждой фазой:
- сумма сил на опорах $\approx W$;
- крен в допуске;
- ЦТ (по распределению сил) внутри опорного многоугольника с запасом;
- ветер в допуске.

- **Ручное управление:** радиопульт с кнопкой «мёртвого человека» (как на фото), аварийные стопы внутри и снаружи.
- **При пропадании питания** все тормоза закрываются, дом остаётся в текущей фазе. Обе фазы устойчивы.
- **Питание:** кабель 380 В на барабане (7–10 кВА) либо АКБ LiFePO₄ ≈10 кВт·ч + инверторы. Энергии на ходьбу мало, 0,9 кВт·ч на 100 м.
- **Коммуникации:** вода, канализация и электричество через гибкие отстёгиваемые вводы, либо автономный дом (баки, септик). Перед ходьбой обязательно отсоединить.

8. FreeCAD-модель

Файлы лежат в cad/.

Скрипт walking_castle.py — параметрическая модель: * запуск: freecadcmd walking_castle.py [KEY=VALUE ...], либо в FreeCAD через «Макросы → Выполнить»; * параметры задаются в начале файла, в params.json рядом со скриптом или в командной строке. Копия параметров пишется в таблицу «Параметры» внутри .FCStd; * основные параметры: DOME_D, DOME_FREQ (2/3/4), DOME_CUT, WALL, FLOOR_D, LEG_X, LEG_Y, STRIDE, LIFT_STROKE, FOOT_D, PAD_D, SCHEME (A/B), POSE (stand / pad / leg_swing), STAIR_FOLDED.

Состав модели. Объекты сгруппированы и названы по-русски, у каждого есть свойство Massa_kg: * купол: стержни 100×50, сферические узлы, панели-сэндвичи толщиной 100 мм, стеклопакеты, опорное кольцо; * платформа: кольцо, главные балки, лаги, пол с люком, облицовка торца; * ходовая часть: направляющие, каретки, рама ног, 4 ноги (стойка-кожух, телескоп 220×220, привод подъёма, подпятник Ø800 на шаре), челночный привод (A: 4 шаговых привода); * центральная опора: колонна, подкосы, ОПУ с приводом, плита; * складная лестница (разложена или сложена).

Выходные файлы: * walking_castle_<схема>_<поза>.FCStd / .step; * mass_*.json — масса и ЦТ; * mesh_*/*.stl — для рендера.

Рендеры строит render_mpl.py: matplotlib по STL. GUI-рендер FreeCAD на сервере без дисплея давал пустые кадры.

Модель концептуальная. Сварные узлы, фаски, крепёж, уплотнения панелей и разделка стыков не прорисованы. Тела пересекаются в узлах. Для КД её нужно перестроить в PartDesign/Assembly на основе этих параметров.

9. Открытые вопросы к вам

1. **Назначение и сценарий.** Как часто и как далеко ходить? Это аттракцион с «шоу-шагом» на месте или перемещение по участку? Какой грунт и уклон трассы?
2. Принимаете ли **центральную колонну с плитой** (схема В)? Или принципиально нужна «чистая» 4-ногая ходьба (схема А: 8 приводов, в 2 раза медленнее, запас устойчивости ~0,1 м)?
3. Размеры: купол Ø6 м и просвет 2,1–2,4 м (машина под домом, как на фото) подходят? Можно ли опустить дом, чтобы снизить ЦТ?
4. Находятся ли люди внутри во время ходьбы? Какой крен допустим (предлагаю ≤1°)?

5. Климат: снеговой район, минимальная температура. Это влияет на остекление, теплотехнику и выбор гидравлики.
 6. Бюджет приводов: ПРВП-электроцилиндры (дорого, премиум) или винтовые домкраты 10 т (дёшево, свои руки)?
 7. Питание: кабель 380 В или автономно от АКБ?
 8. Каркас купола: сталь, как в ТЗ, или дерево/алюминий для облегчения на 1,5–2 т?
 9. Поворот: нужен ли разворот на месте (ОПУ) или достаточно ходьбы по прямой (тогда 5 приводов)?
 10. Правовой статус: некапитальное сооружение, мобильное здание или транспортное средство. От этого зависят требования к расчёту и согласованию.
 11. Коммуникации: автономный дом или подключение через гибкие вводы?
-

10. Оговорки

- Все оценки концептуальные: упрощённые схемы, коэффициенты с запасом, без FEM и без динамики.
- Модели каталожных приводов указаны как ориентир класса, их нужно сверить с актуальными каталогами.
- Нагрузки по СП 20.13330 (снег, ветер) приняты упрощённо. Для конкретной площадки нужен расчёт по нормам и проверка грунта.
- В схеме В главный риск — качество трассы под плитой. В схеме А — малый запас устойчивости на трёх ногах.