

Проектирование и укрепление откосов от размыва

Выбор типа укрепления

Верхняя часть насыпи включая берму укрепляется от размыва атмосферными осадками и стекающей с основной площадки воды (водная эрозия) созданием дернового покрова.

Укреплению подлежат:

- откосы насыпи до бермы, обочины насыпи и поверхность бермы.

Нижняя часть насыпи – откос ниже незатопляемой бермы подлежит укреплению с учетом его подтопления и волнового воздействия.

Основными расчетными параметрами при проектировании укрепления нижней части насыпи являются:

- высота волны с обеспеченностью 1% её непревышения $h_{1\%}$ (п.8 задания);

- средняя длина волны λ (п.9 задания).

При высоте волны до 1,5 м выбираем **каменную наброску**, при большей высоте волны **железобетонные плиты, омоноличенные по контуру**.

Расчет каменной наброски

Расчетный размер камня в наброске d_k выбирается, исходя из требований обеспечения устойчивости камня на откосе данной крутизны в зависимости от высоты и длины волны:

1) Определяется вес расчетного камня Q_k (кН) по формуле

$$Q_k = \frac{K_{f-r} \cdot \gamma_k \cdot h_{1\%}^2 \cdot \lambda}{\left(\frac{\gamma_k}{\gamma_B} - 1\right) \cdot \sqrt{1 + (\operatorname{ctg} \alpha)^3}}$$

где: K_{f-r} – коэффициент, зависящий от формы элемента, применяемого в наброске (для камня $K_{f-r} = 0,025$);

γ_k и γ_B – плотность материалов камня и воды соответственно ($\gamma_k = 24,5 \text{ кН/м}^3$, $\gamma_B = 10 \text{ кН/м}^3$);

α – угол наклона поверхности откоса к горизонту (откос бермы = 1:2);

λ – средняя длина волны, м

$h_{1\%}$ – высота волны, м.

2) Определяется диаметр расчетного камня d_k , принимая условно форму камня в виде шара по формуле

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{Q_k}{0,524 * \gamma_k}}$$

При диаметре камня $d_k \leq 0,15$ м принимаем однослойную наброску, если $d_k > 0,15$ м, то принимают двухслойную наброску.

Для двухслойной каменной наброски расчетный размер камня второго (нижнего) слоя d_{k-2} определяется из условия их фильтрационной устойчивости

$$d_{k-2} = 0,37 \cdot d_{k-1}$$

где d_{k-1} - диаметр первого вышележащего контактирующего слоя каменной наброски.

Толщина однослойной каменной наброски (защитной призмы) t должна быть не менее $t \geq 3d_k$ при несортированной горной массе и не менее $t \geq 2,5d_k$ – при сортированном камне.

При двухслойной каменной наброске толщина каждого i -го слоя наброски определяется $t_i \geq 2d_{k-i}$

Толщина защитного слоя призмы a должна отвечать условию $a \geq 3d_k$, но быть не менее 1,0 м.

Пример расчета каменной наброски

Высота волны – 1,46 м

Длина волны – 8,37 м

$$Q_k = \frac{K_{f-r} \cdot \gamma_k \cdot h_{1\%}^2 \cdot \lambda}{\left(\frac{\gamma_k}{\gamma_B} - 1\right) \cdot \sqrt{1 + (\operatorname{ctg} \alpha)^3}} = \frac{0,025 \cdot 24,5 \cdot 1,46^2 \cdot 8,37}{\left(\frac{24,5}{10} - 1\right) \cdot \sqrt{1 + 2^3}} = 2,55 \text{ кН}$$

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{Q_k}{0,524 \cdot \gamma_k}} = \sqrt[3]{\frac{2,55}{0,524 \cdot 24,5}} = 0,59 \text{ м}$$

Так как $d_k > 0,15$ м, то принимается двухслойная наброска, а диаметр камня второго слоя равен:

$$d_{k-2} = 0,37 \cdot d_{k-1} = 0,37 \cdot 0,59 = 0,22 \text{ м}$$

Толщина первого слоя каменной наброски равна:

$$t_{k-1} = 2 \cdot d_{k-1} = 2 \cdot 0,59 = 1,18 \text{ м}$$

Толщина второго слоя каменной наброски равна:

$$t_{k-2} = 2 \cdot d_{k-2} = 2 \cdot 0,22 = 0,44 \text{ м}$$

Расчет толщины железобетонных плит

Толщина определяется, исходя из требований обеспечения плиты от всплытия (из-за противодействия воды), сдвига и опрокидывания её расчетной волной, по формуле

$$\delta_{пл} = \frac{0,07 \cdot K_б \cdot \eta_{пл} \cdot h_{1\%} \cdot \sqrt[3]{\lambda/V}}{\left(\frac{\gamma_{пл}}{\gamma_в} - 1\right)} \times \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m}$$

где $K_б$ – коэффициент запаса (для линий: скоростных, особогрузонапряженных и I категории – 1,30; II категории – 1,20; III категории – 1,15 и IV категории – 1,10);

$\eta_{пл} = 1,10$ – коэффициент, учитывающий тип плиты (при омоноличенных плитах);

$h_{1\%}$ – высота волны 1%-ной обеспеченности, м;

λ – средняя длина волны, м;

$B = 2,5$ м – размер плиты, перпендикулярный урезу воды;

$\gamma_{пл} = 25,0$ кН/м³ и $\gamma_в = 10,0$ кН/м³ – удельный вес материала плиты и воды соответственно;

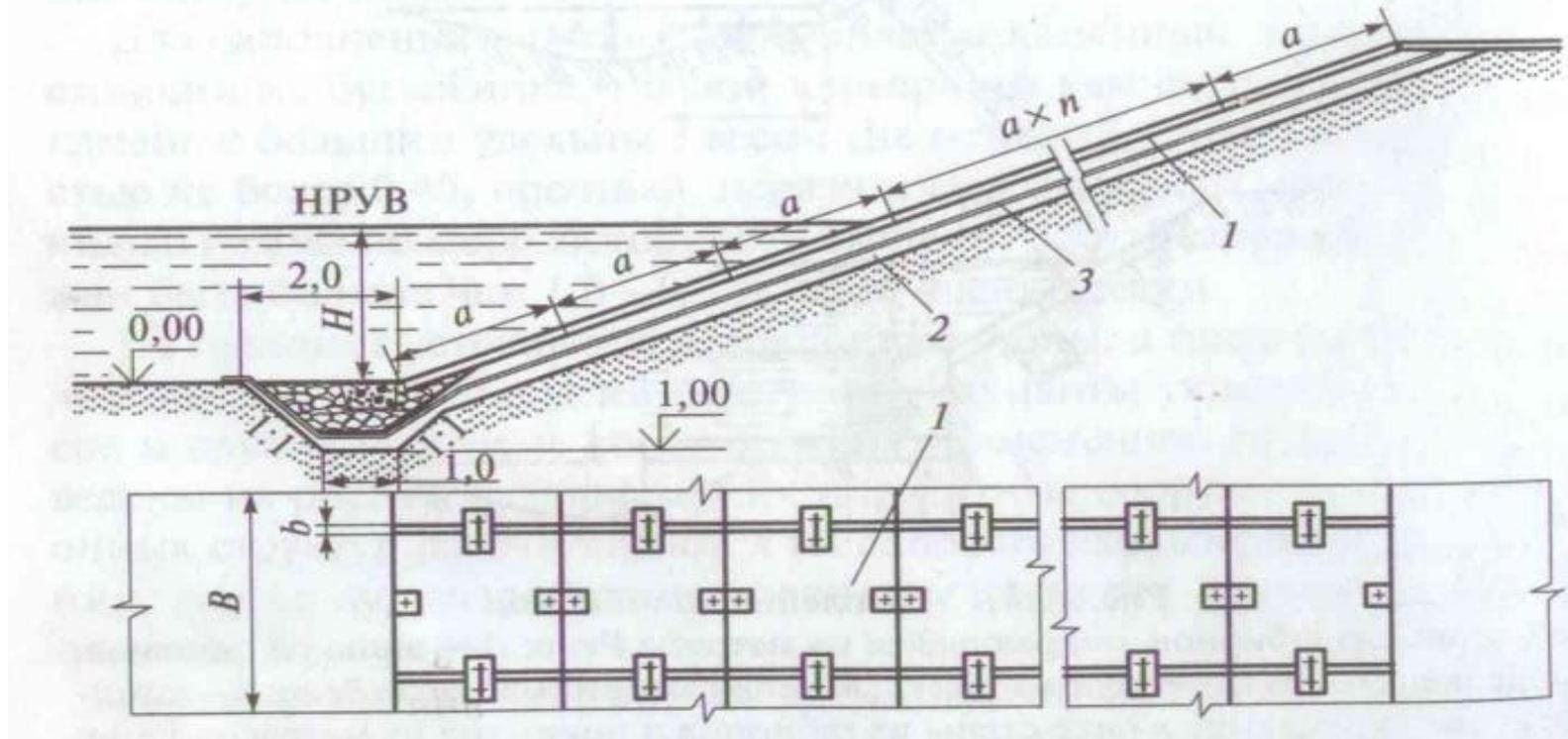
$m = 2,0$ – показатель заложения откоса.

Железобетонные плиты, омоноличенные по контуру в карты, применяются при скорости течения до 6,0 м/с и высоте волны до 3,0 м. Типовыми являются плиты размером 2,50х3,00 толщиной от 0,10 м до 0,20 м.

Эти плиты соединяются сваркой арматурой, выпуски которой делают по краям. Карты могут иметь размеры до 20-30 м. Шов между соседними картами принимается 0,06-0,10 м и заделывается пластичными смесями.

Омоноличенные карты укладывают на подготовку из разнозернистого гравия или щебня толщиной 10 см, а под швами делается ленточный фильтр.

Схема покрытия из плит, омоноличенных по контуру



1 – железобетонные плиты; 2 – обратный фильтр; 3 – геотекстиль; НРУВ – наивысший расчетный уровень;
 B – размер плиты, перпендикулярный срезу воды; a – длина плиты; b – ширина шва между плитами.

Количество плит, укладываемых по откосу:

$$n_{пл} = l/a$$

где l – длина образующей укрепляемого откоса

$$l = H_{ук} * \sqrt{1 + m^2}$$

где $H_{ук}$ – высота укрепляемого откоса

m – заложение крутизны откоса.

Пример расчета железобетонных плит

Категория линии - 2

Высота волны – 1,64 м

Длина волны – 7,65 м

Высота бермы – 7 м

$$\delta_{\text{пл}} = \frac{0,07 \cdot K_{\text{б}} \cdot \eta_{\text{пл}} \cdot h_{1\%} \cdot \sqrt[3]{\lambda/V}}{\left(\frac{\gamma_{\text{пл}}}{\gamma_{\text{в}}} - 1\right)} \times \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m} = \frac{0,07 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,64 \cdot \sqrt[3]{7,65/2,5}}{\left(\frac{25}{10} - 1\right)} \times \frac{\sqrt{2^2 + 1}}{2} = 0,16 \text{ м}$$

Ближайшая конструктивная толщина плиты равна 0,2 м.

$$l = H_{\text{ук}} \cdot \sqrt{1 + m^2} = 7 \cdot \sqrt{1 + 2^2} = 15,65 \text{ м}$$

$$n_{\text{пл}} = \frac{l}{a} = \frac{15,65}{3} = 5 \text{ плит}$$

Оставшиеся 0,65 м омоноличиваются.

Характеристики плитных покрытий

Размер плит в плане, м	Толщина плиты, δ _{конст} , м	Допускаемая скорость течения воды, м/с	Допускаемая высота волны, м	Объем одной плиты, м ³	Масса металла одной плиты, кг	Масса плиты, кг
Бетонные плиты						
1,00 × 1,00 1,00 × 1,00	0,16 0,20	до 3,0	до 0,7	0,16 0,20	0,23 0,23	0,400 0,500
Железобетонные плиты						
2,50 × 3,00 2,50 × 3,00	0,15 0,20	до 1,0	до 1,5	1,10 1,48	70,1 78,4	2,750 3,700
Плиты из обычного железобетона, омоноличенные по контуру						
2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50	0,10 0,12 0,15 0,20 0,10 0,12 0,15 0,20	до 6,0	1,0 1,5 2,0 2,5	0,72 0,85 1,07 1,44	66,5/22,4 78,3/32,4 78,8/38,0 93,1/46,4	1,800 2,100 2,700 3,600
2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50	0,10 0,12 0,15 0,20		1,0 1,5 2,0 2,5	0,37 0,45 0,56 0,75	32,4/18,4 38,1/28,4 38,3/34,0 45,2/42,4	0,900 1,100 1,400 1,900
Плиты из предварительно напряженного железобетона, омоноличенные по контуру						
2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 3,00 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50	0,10 0,15 0,17 0,20 0,10 0,15 0,17 0,20	до 6,0	1,5 2,0 2,5 3,0	0,72 1,05 1,22 1,44	63,5/33,0 95,8/53,0 109,7/65,0 128,9/65,0	1,800 2,600 3,000 3,600
2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50 2,50 × 1,50	0,10 0,15 0,17 0,20		1,5 2,0 2,5 3,0	0,35 0,52 0,62 0,73	34,1/31,2 48,2/12,9 85,2/14,7 64,6/17,2	0,880 1,300 1,600 1,800

Проектирование обратных фильтров

Обратный фильтр служит для предотвращения механической суффозии мелких частиц грунта откоса в поры каменной наброски при понижении уровня подтопления, спаде пойменных вод и накате и откате волны на откос. Обратный фильтр, как правило, по технологическим соображениям принимается однослойным. При этом обратный фильтр проектируется из условия не допущения выноса частиц грунта в фильтр, а также вымывания частиц самого фильтра через наброску. Для однослойных фильтров из зернистых материалов требования к их гранулометрическому составу определяются формулами:

$$C_{U-\phi} = \frac{d_{60-\phi}}{d_{10-\phi}} = 2 \div 8$$

если не выполняется, то производят отсеивание фракций

$$d_{50-\phi} \geq 0,20d_{k-i}$$

если не выполняется, то укладывают нетканый геотекстиль

$$d_{50-\phi} \leq 10d_{50-z}$$

если не выполняется, то укладывают нетканый геотекстиль

где $C_{U-\phi}$ – степень неоднородности гранулометрического состава фильтра;

$d_{60-\phi}$, $d_{50-\phi}$ и $d_{10-\phi}$ – размеры частиц фильтра, меньше которых по массе в нем содержится соответственно 60%, 50% и 10%, определяемые по кривой гранулометрического состава (п. 12 из задания)

d_{k-i} – расчетный размер камня i -го слоя каменной наброски, контактирующего с фильтром;

d_{50-z} – размеры частиц грунта насыпи, контактирующего с фильтром, меньше которых по массе в нем содержится 50%. (п.6.6 из задания)

- Если не выполняется условие по контакту с каменной наброской, то рассматривают возможность укладки каменной наброски с большим количеством слоев и соответственно уменьшение величины $d_{50-\phi}$ либо укладку под фильтр геотекстиля. В этом случае в качестве геотекстиля применяют нетканый материал, имеющий толщину не менее 4 мм и поверхностную плотность не менее 500 г/м².

Толщина обратного однослойного фильтра из зернового материала δ_{ϕ} принимается

$$\delta_{\phi} \geq 10 \cdot d_{50-\phi}$$

При этом минимальная толщина фильтра δ_{ϕ} принимается не менее 20 см при отсыпке посуху и не менее 30 см при отсыпке в воду.

Если толщина фильтра δ_{ϕ} получилась более 35 см, то переходят на двухслойный фильтр.

Если зерновой материал применяется в комбинации с геотекстилем, то его толщина уменьшается до величины

$$\delta_{\phi} \geq 4 \cdot d_{50-\phi}$$

а минимальная толщина может быть уменьшена до 10 см.

При постоянном подтоплении откоса насыпи технологически целесообразно применять обратные фильтры из геотекстиля без дополнительного слоя зернистых материалов.

В качестве такого геотекстиля используют специальные толстые фильтрационные нетканые материалы толщиной не менее 10 мм и поверхностной плотностью не менее 1000 г/м²

В качестве обратного фильтра под железобетонными плитами применяют слой щебня или песчано-гравийной смеси. Требования к материалу такого фильтра аналогичны, как и для обратного фильтра под каменной наброской, и он должен предотвращать вымывание частиц грунта и частиц самого фильтра через швы в плитах. Для однослойного обратного фильтра параметры подбираются по формулам:

$$C_{U-\phi} = \frac{d_{60-\phi}}{d_{10-\phi}} = 2 \div 8$$

если не выполняется, то производят отсев фракций

$$b \leq 0,6d_{25-\phi}$$

если не выполняется, то укладывают нетканый геотекстиль

$$d_{50-\phi} \leq 10d_{50-z}$$

если не выполняется, то укладывают нетканый геотекстиль

$b = 6$ мм – ширина шва между плитами.

Если не выполняется условие по грунту, то под фильтр предусматривают укладку геотекстиля в виде нетканого материала, имеющего толщину не менее 4 мм и поверхностную плотность не менее 500 г/м².

Толщина обратного однослойного фильтра под плитами определяется аналогично, как и при каменной наброске.

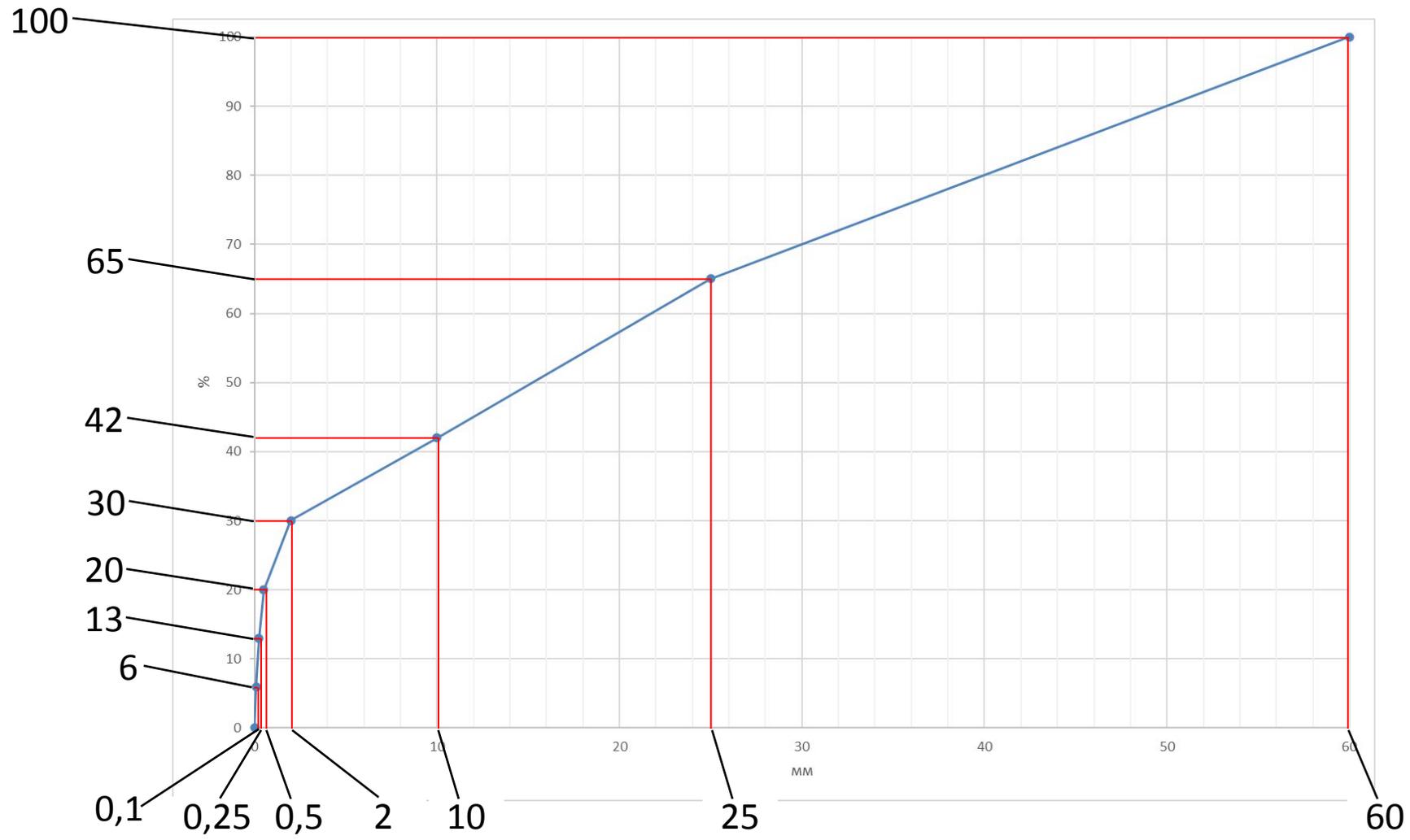
Пример проектирования обратного фильтра для каменной наброски

Толщина камня второго слоя каменной наброски – 0,22 м

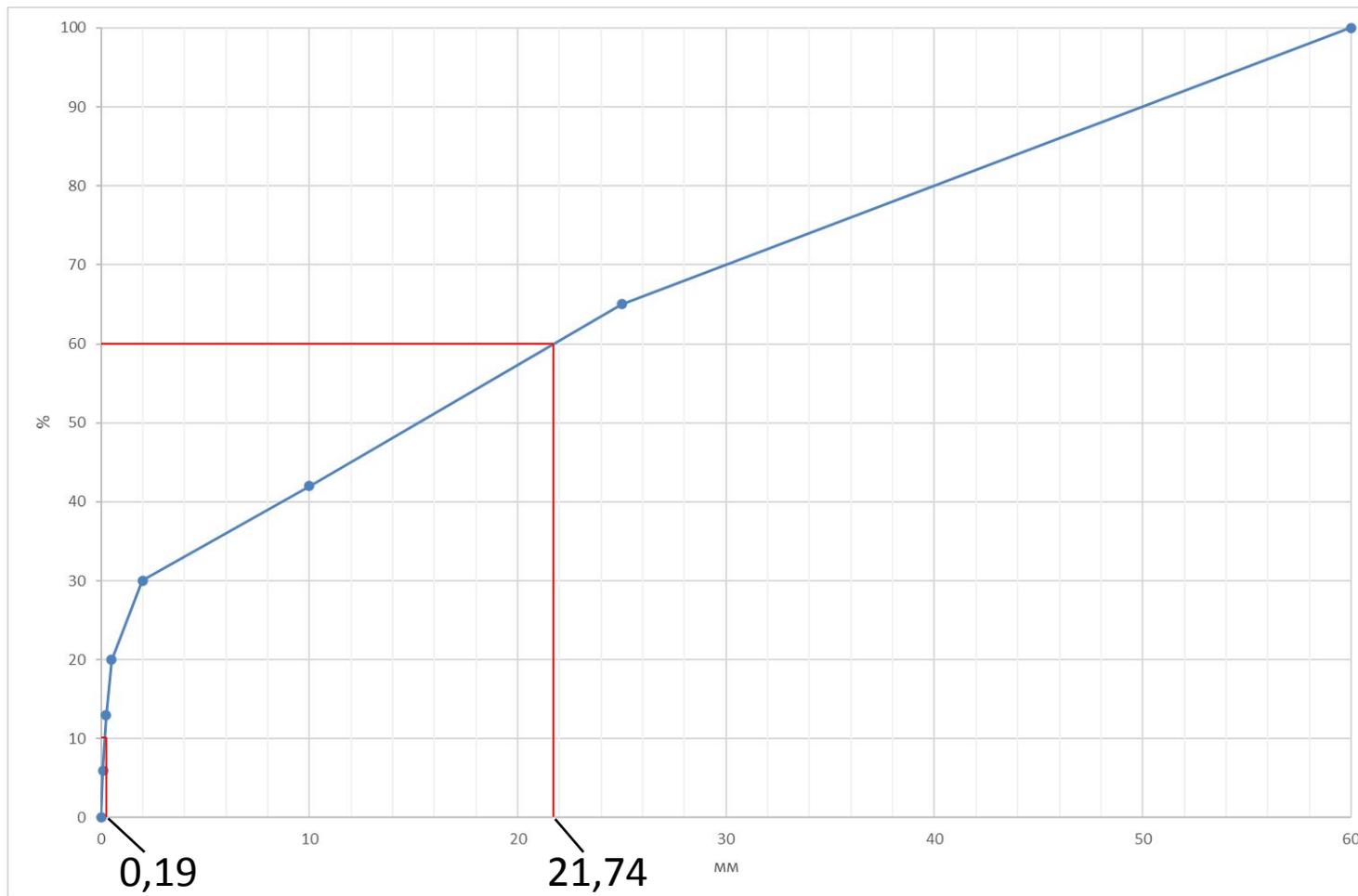
Диаметр частиц грунта насыпи, меньше которых по весу 50% – 0,12 мм

Гранулометрический состав грунта для обратного фильтра

Диаметр частиц, мм	60-25	25-10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
Содержание, %	35	23	12	10	7	7	6



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-\phi}$ и $d_{10-\phi}$

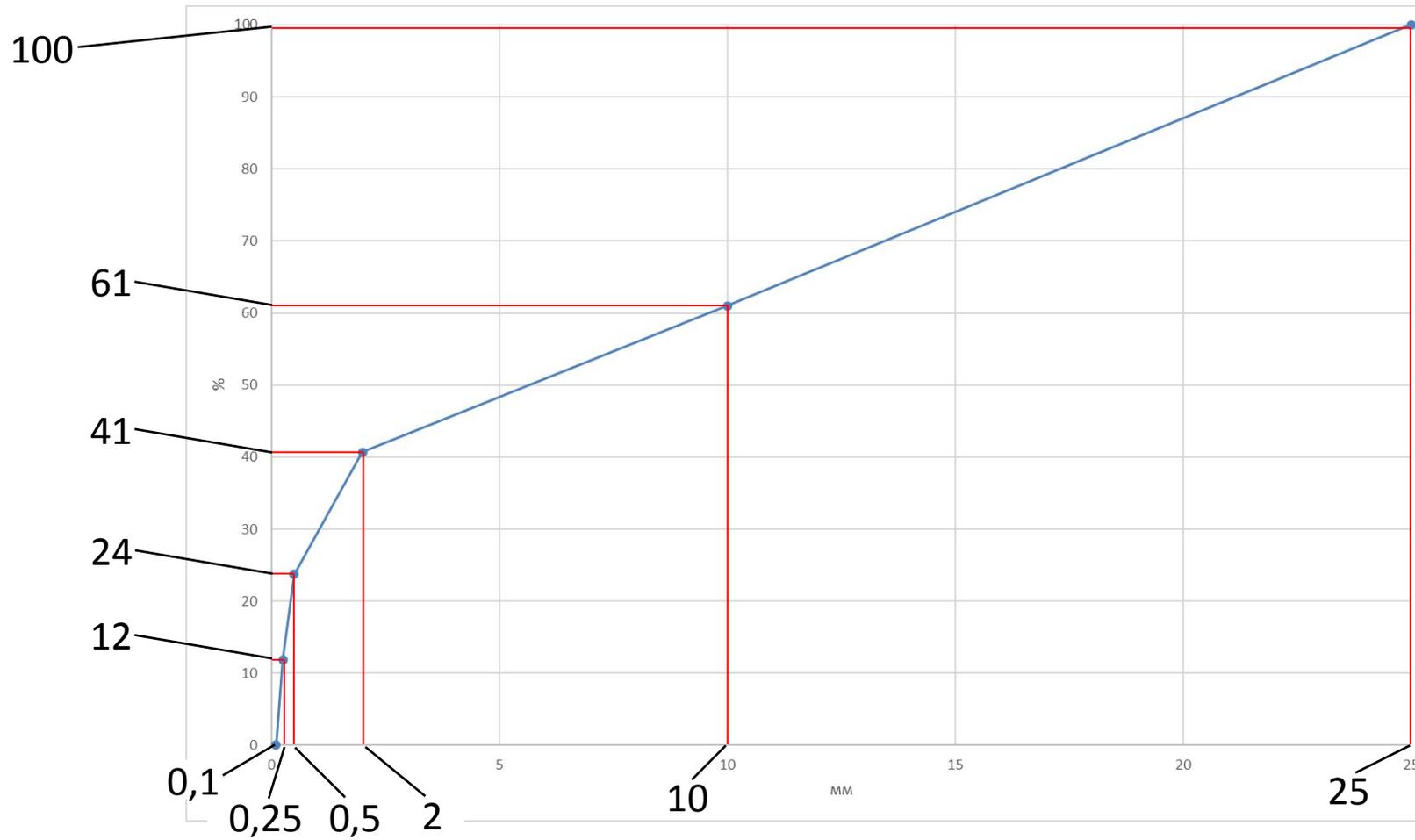


$$C_{U-\phi} = \frac{21,74}{0,19} = 117,1 > 8$$

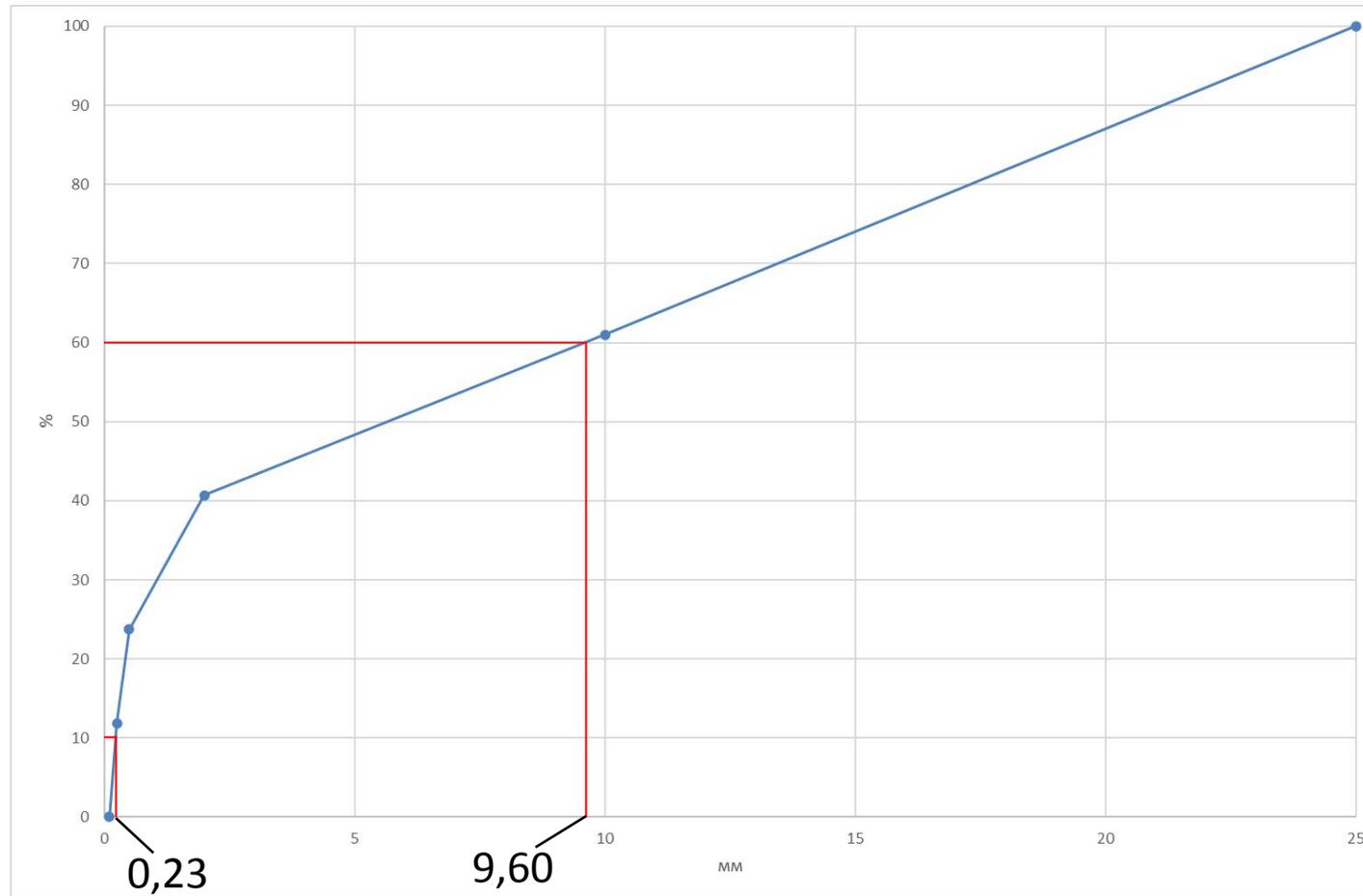
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. Можно производить отсев фракций, как мелких, так и крупных. Но, также желательно избавиться от засорителя $<0,1$ мм. При первом приближении произведем отсев фракций $<0,1$ мм и 60-25 мм.

После отсева фракций необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянные фракции составляли $35+6=41\%$ от всего состава обратного фильтра. После ее отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-41)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	25-10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1
Содержание, %	$23 \cdot 100 / (100 - 41) = 39$	$12 \cdot 100 / (100 - 41) = 20$	$10 \cdot 100 / (100 - 41) = 17$	$7 \cdot 100 / (100 - 41) = 12$	$7 \cdot 100 / (100 - 41) = 12$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-ф}$ и $d_{10-ф}$

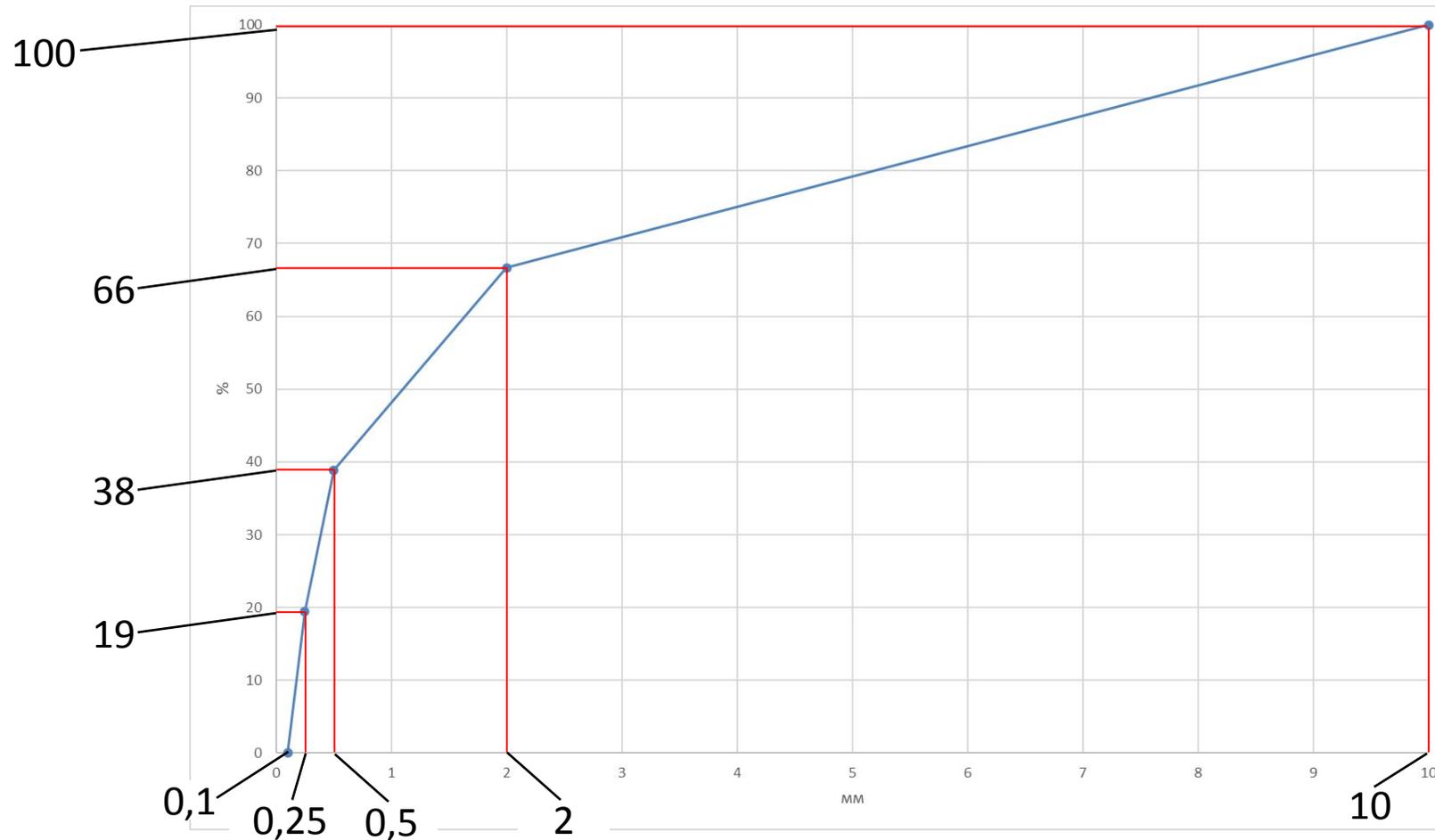


$$C_{U-ф} = \frac{9,60}{0,23} = 42,4 > 8$$

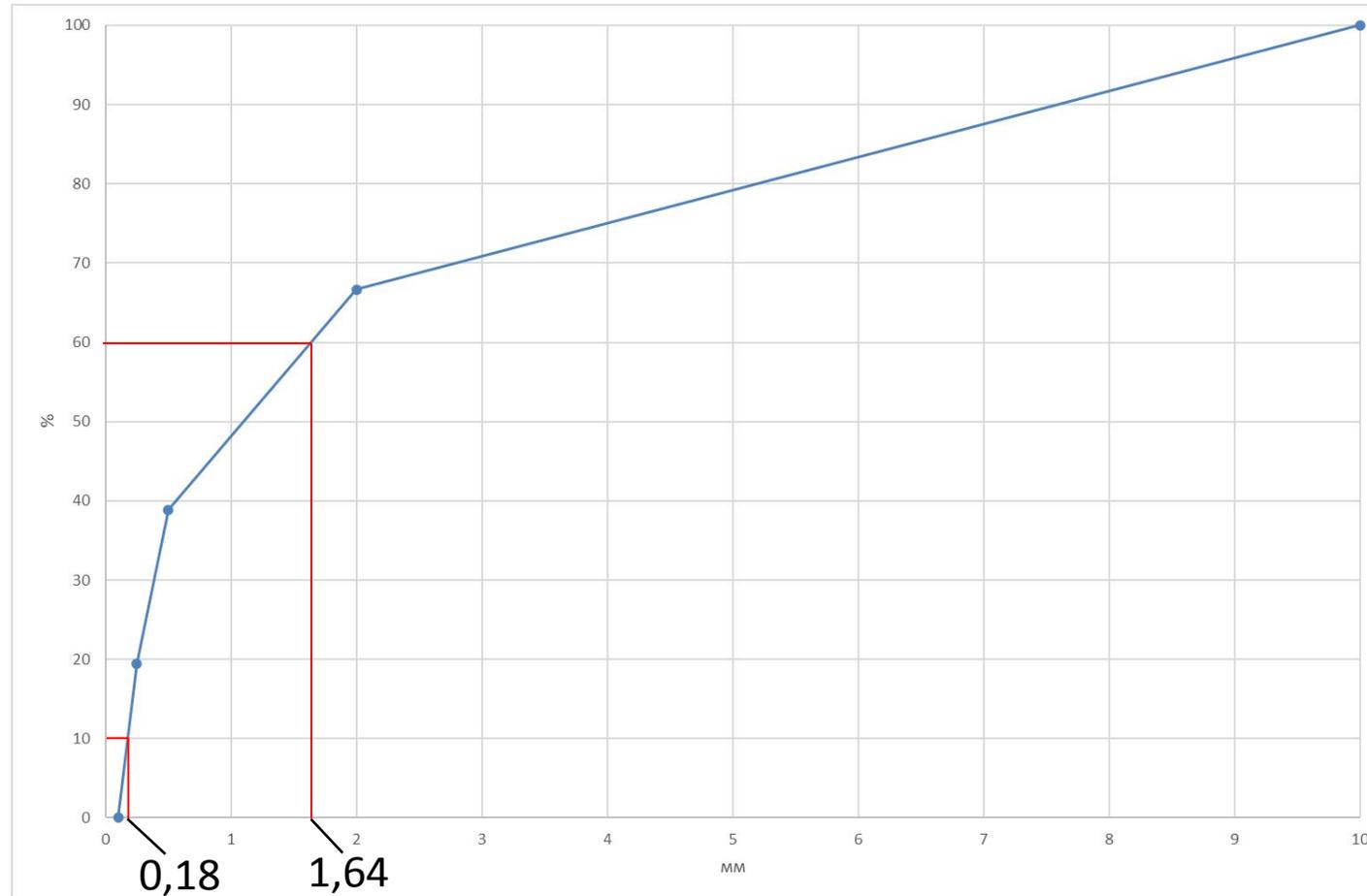
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. Производим отсев фракции 25-10 мм.

После отсева фракции необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянная фракция составляла 39% от всего состава обратного фильтра. После ее отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-39)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1
Содержание, %	$20 * 100 / (100 - 39) = 34$	$17 * 100 / (100 - 39) = 28$	$12 * 100 / (100 - 39) = 19$	$12 * 100 / (100 - 39) = 19$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-ф}$ и $d_{10-ф}$

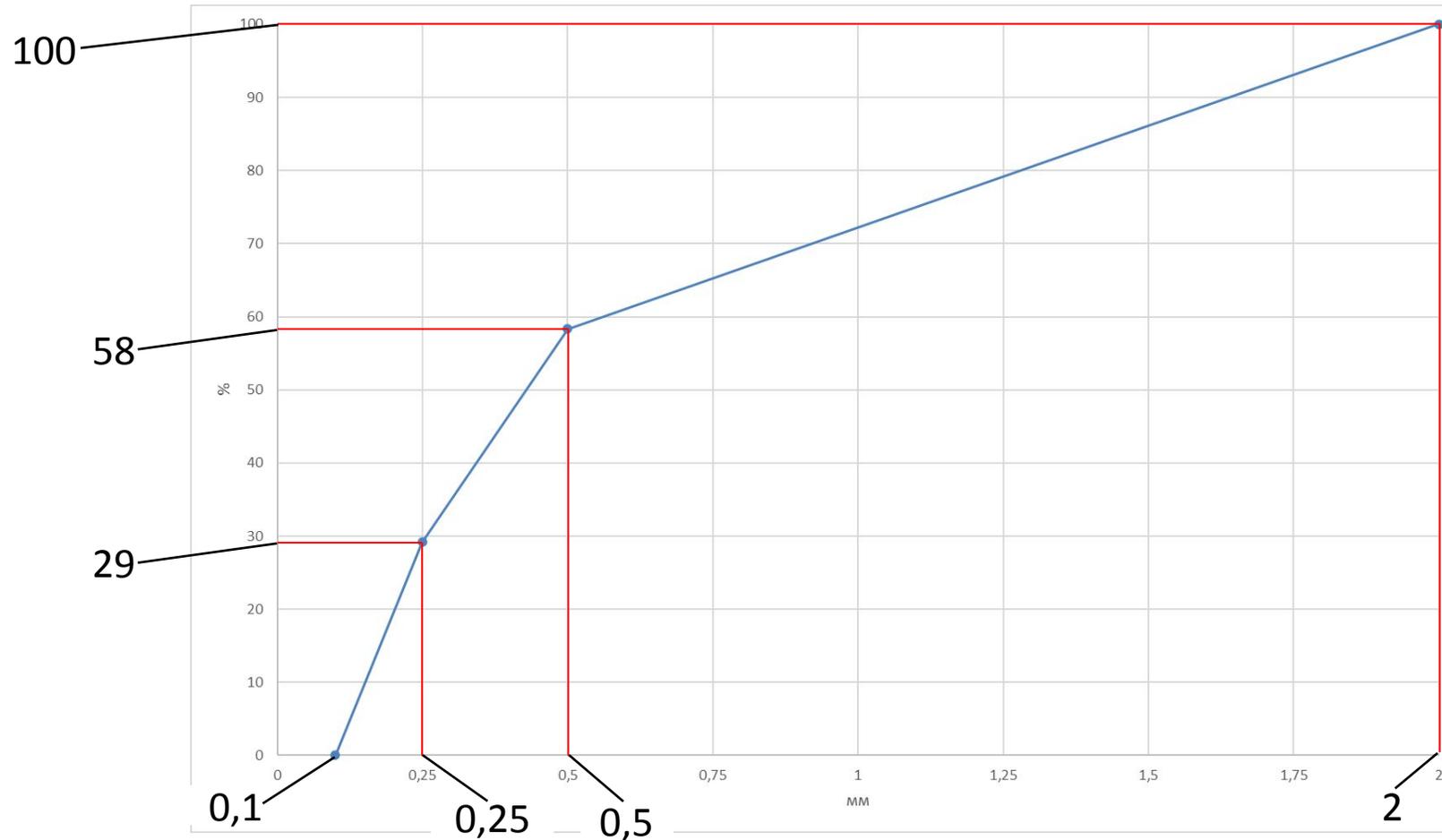


$$C_{U-ф} = \frac{1,64}{0,18} = 9,3 > 8$$

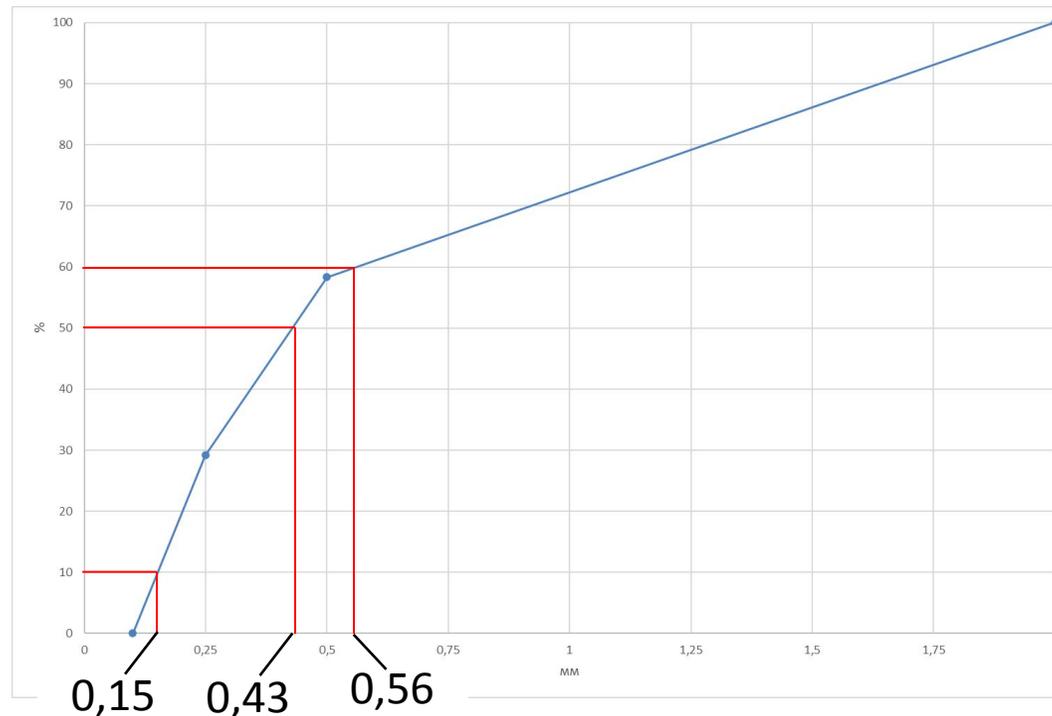
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. Производим отсев фракции 10-2 мм.

После отсева фракции необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянная фракция составляла 34% от всего состава обратного фильтра. После ее отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-34)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1
Содержание, %	$28 * 100 / (100 - 34) = 42$	$19 * 100 / (100 - 34) = 29$	$19 * 100 / (100 - 34) = 29$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-\phi}$ и $d_{10-\phi}$



$$C_{U-\phi} = \frac{0,56}{0,15} = 3,7 < 8$$

Условие выполняется, проверяем оставшиеся условия.

$$d_{50-\phi} \geq 0,2 * d_{к-i}$$
$$0,43 \text{ мм} < 0,2 * 220 \text{ мм} = 44 \text{ мм}$$

$$d_{50-\phi} \leq 10 * d_{50-г}$$
$$0,43 \text{ мм} < 10 * 0,12 \text{ мм} = 1,2 \text{ мм}$$

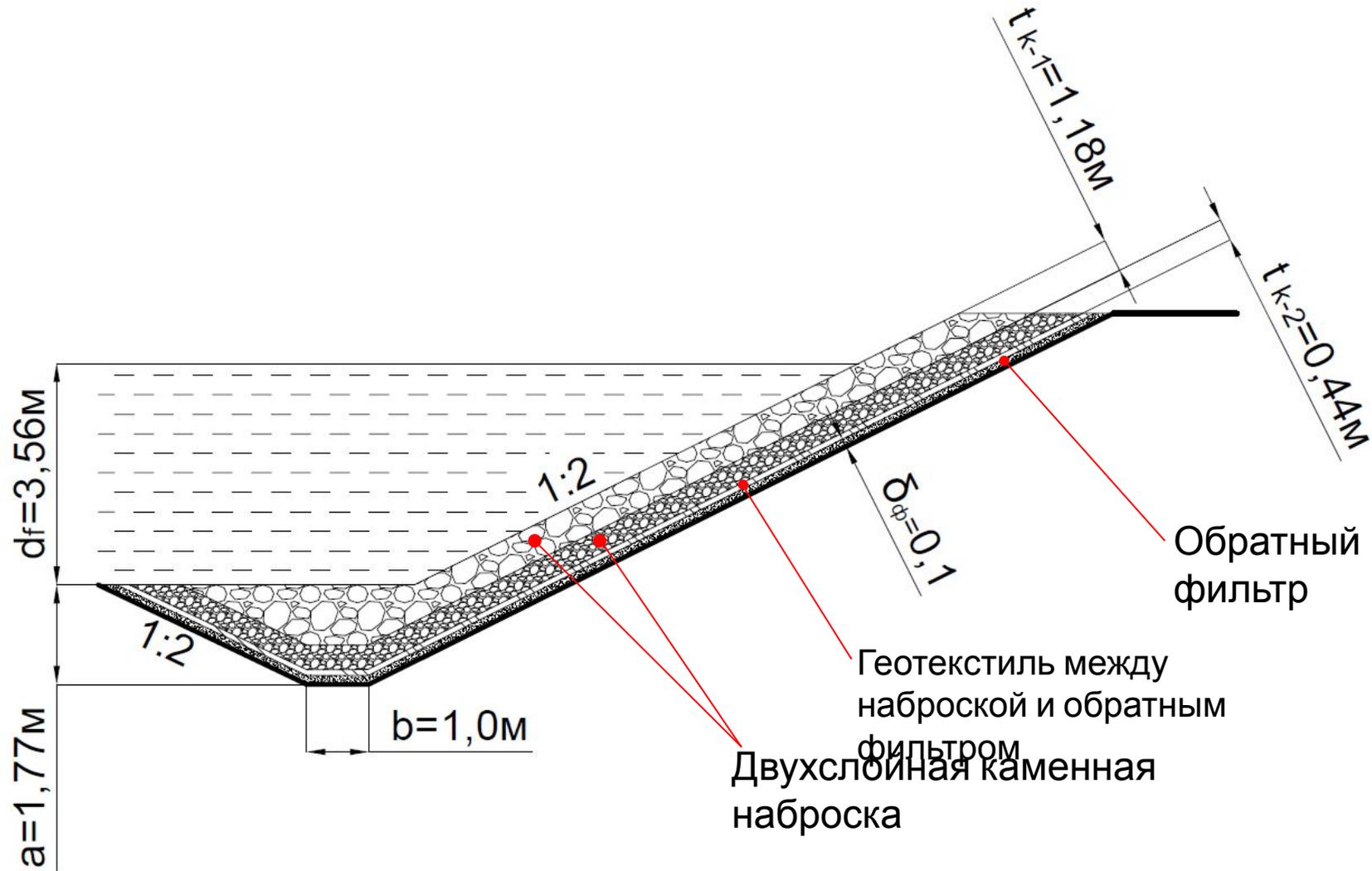
Условие на границе «каменная наброска-обратный фильтр» не выполняется. Чтобы исключить вымывание грунта обратного фильтра через наброску, необходимо устройство слоя геотекстиля между грунтом обратного фильтра и каменной наброской.

Толщина обратного фильтра определяется из условия

$$\delta_{\phi} \geq 4 * d_{50-\phi}$$

$$\delta_{\phi} \geq 4 * 0,43 = 1,72 \text{ мм}$$

Минимальная толщина фильтра $\delta_{\phi}^{min} = 0,1 \text{ м}$. Окончательно принимаем толщину фильтра $\delta_{\phi} = 0,1 \text{ м}$.

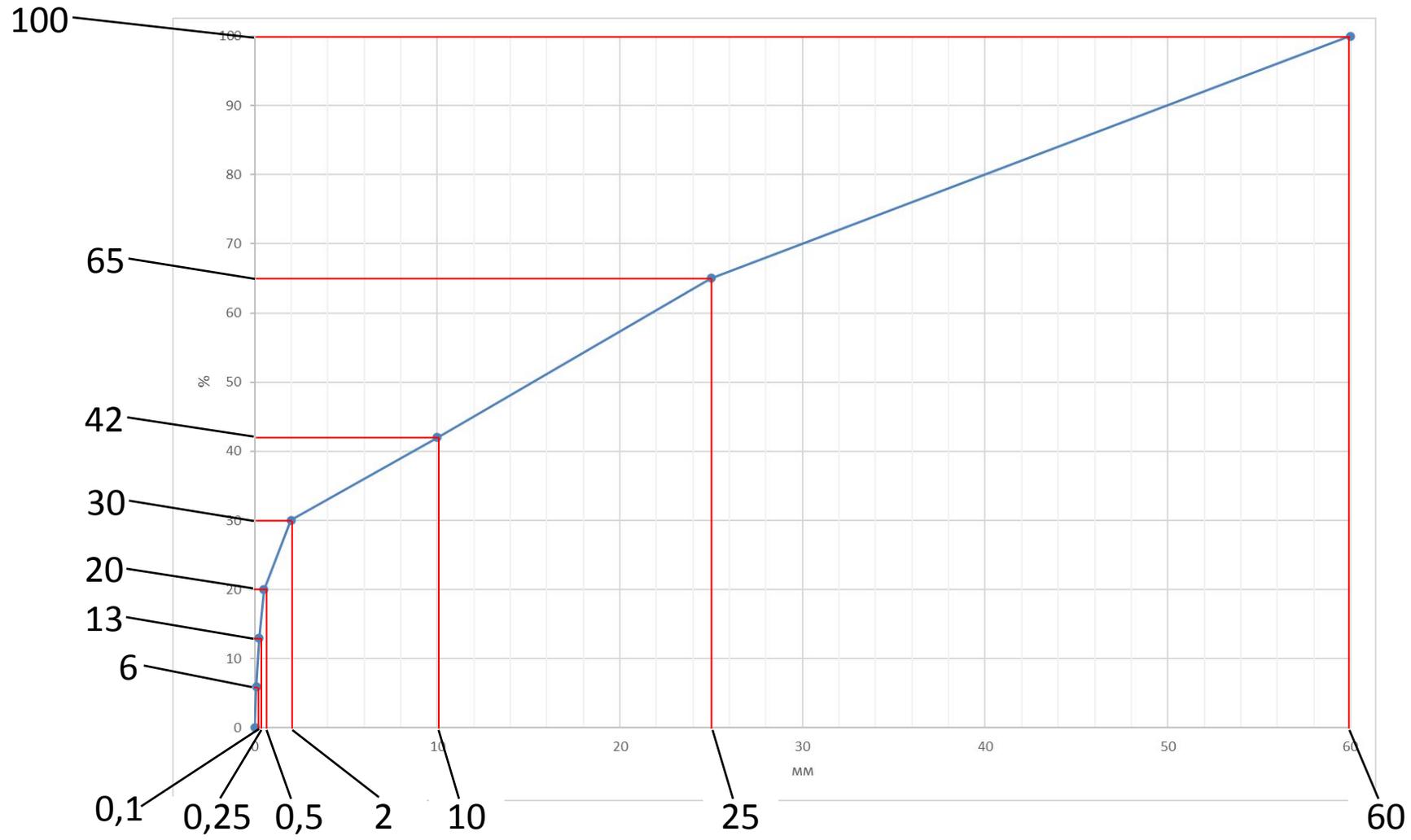


Пример проектирования обратного фильтра для железобетонных плит

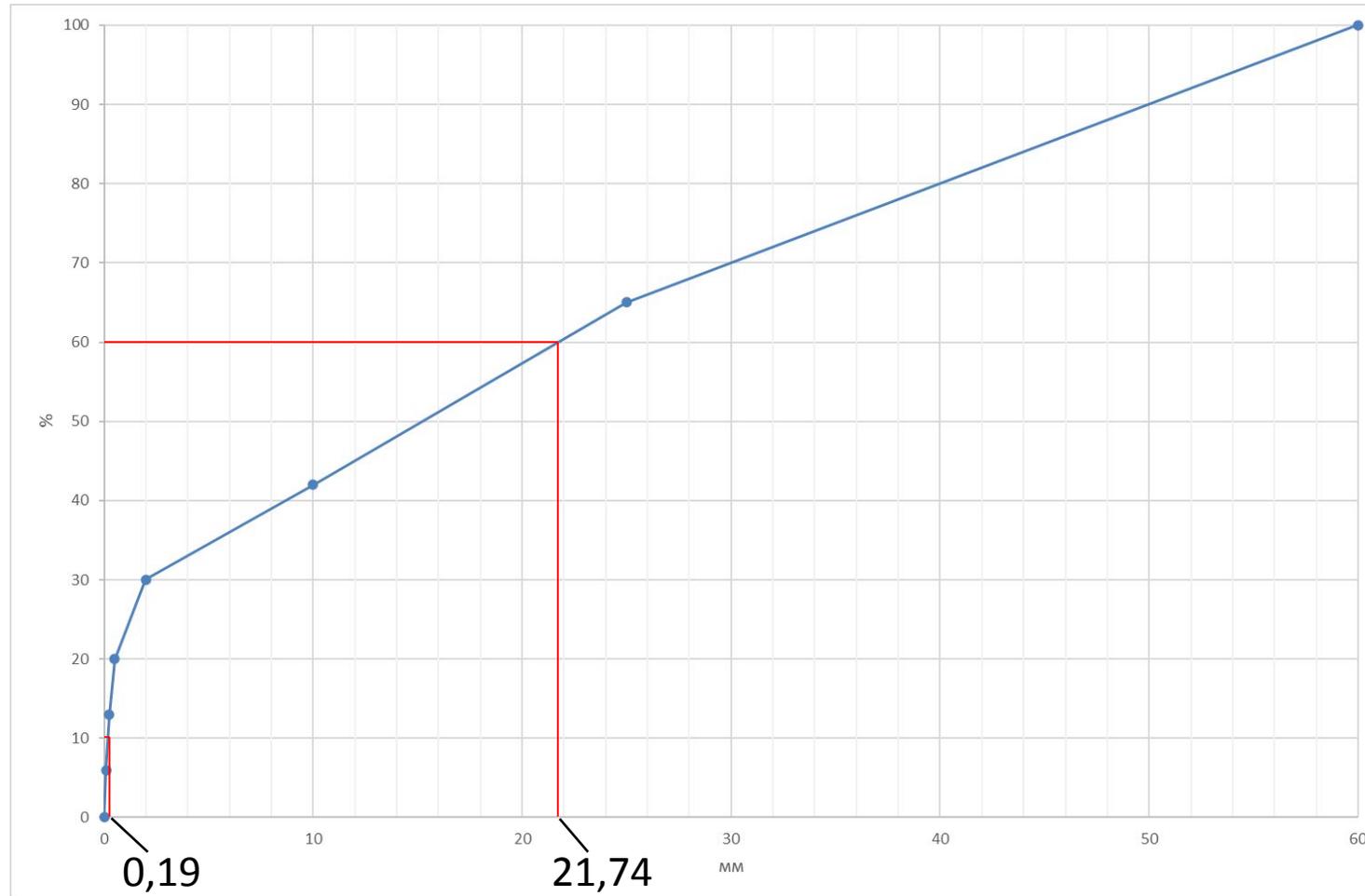
Диаметр частиц грунта насыпи, меньше которых по весу 50% – 0,12 мм

Гранулометрический состав грунта для обратного фильтра

Диаметр частиц, мм	60-25	25-10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
Содержание, %	35	23	12	10	7	7	6



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-\phi}$ и $d_{10-\phi}$

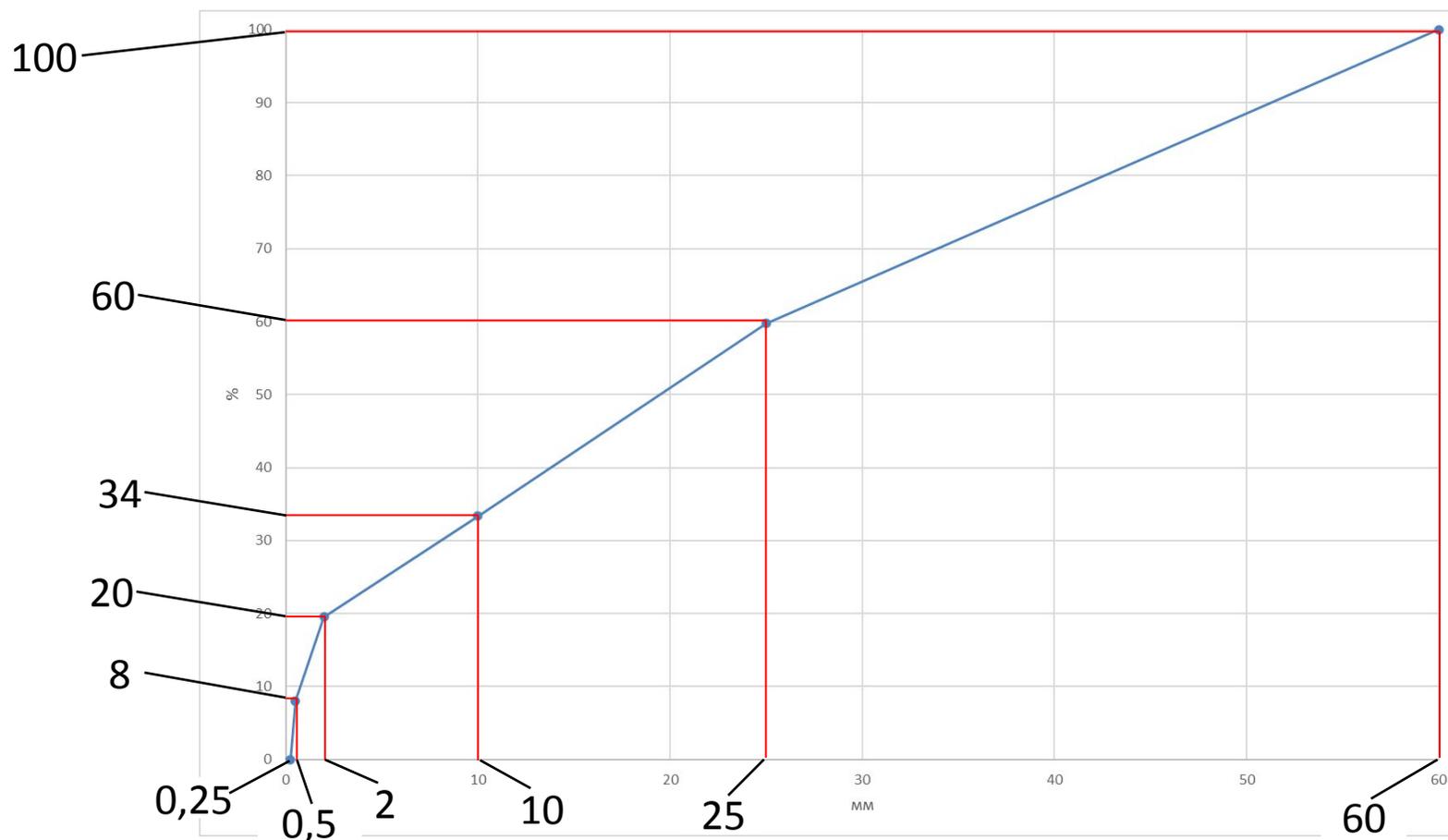


$$C_{U-\phi} = \frac{21,74}{0,19} = 117,1 > 8$$

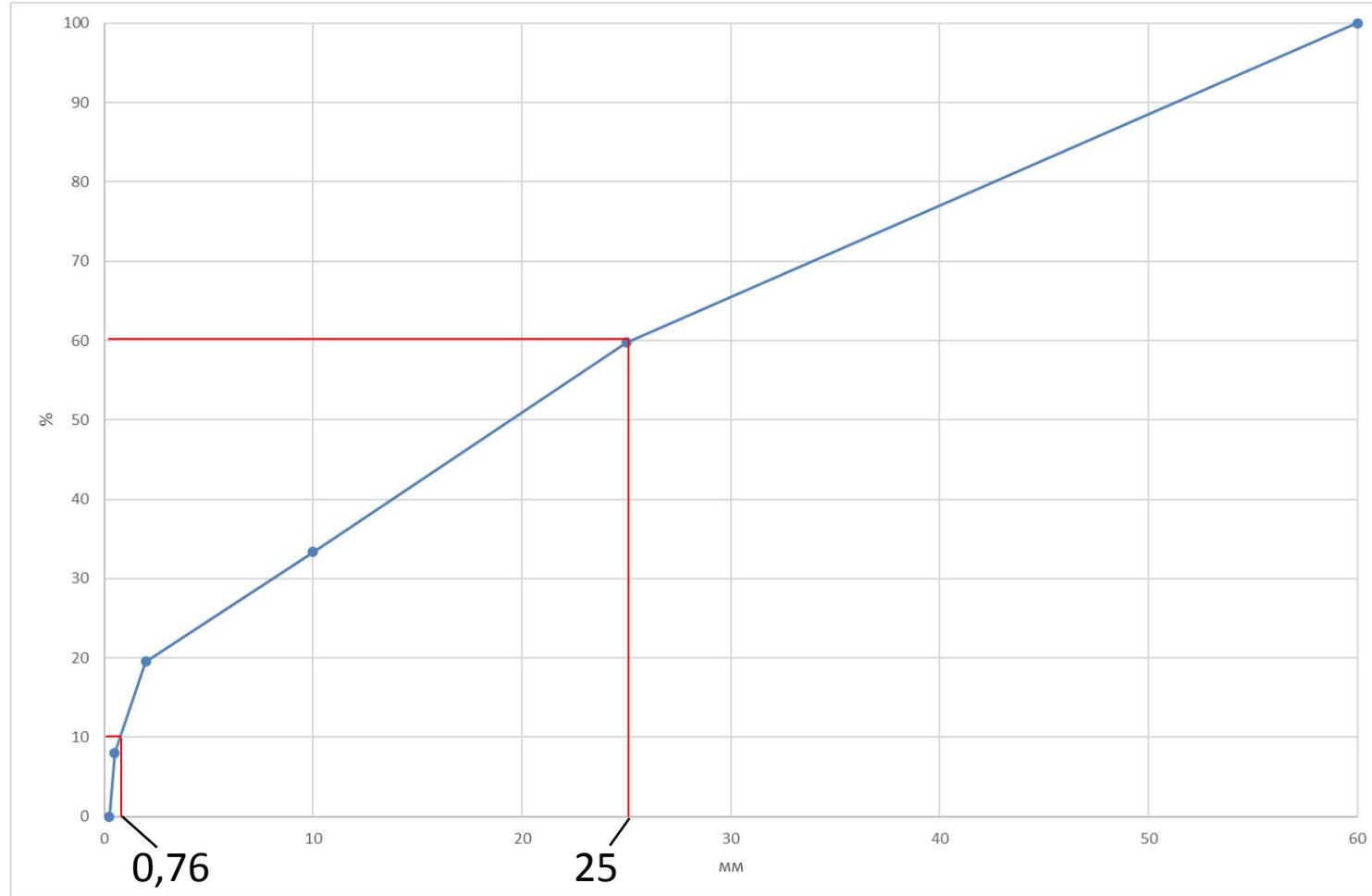
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. В данном примере будем производить отсев мелких фракций. При первом приближении произведем отсев фракций $<0,1$ мм и $0,25-0,1$ мм.

После отсева фракций необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянные фракции составляли $6+7=13\%$ от всего состава обратного фильтра. После их отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-13)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	60-25	25-10	10-2	2-0,5	0,5-0,25
Содержание, %	$35 \cdot 100 / (100 - 13) = 40$	$23 \cdot 100 / (100 - 13) = 26$	$12 \cdot 100 / (100 - 13) = 14$	$10 \cdot 100 / (100 - 13) = 12$	$7 \cdot 100 / (100 - 13) = 8$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-ф}$ и $d_{10-ф}$

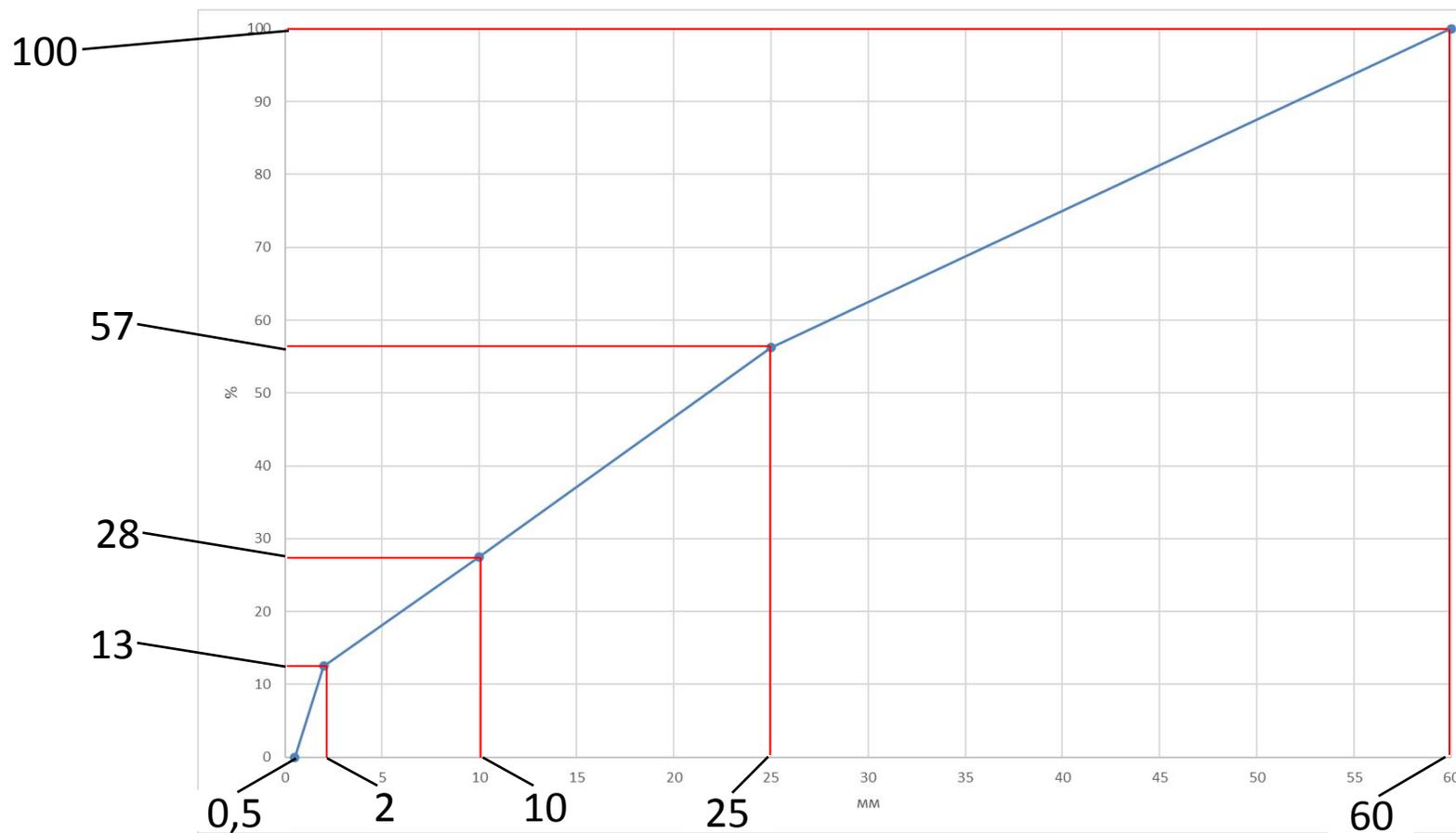


$$C_{U-ф} = \frac{25}{0,76} = 33,4 > 8$$

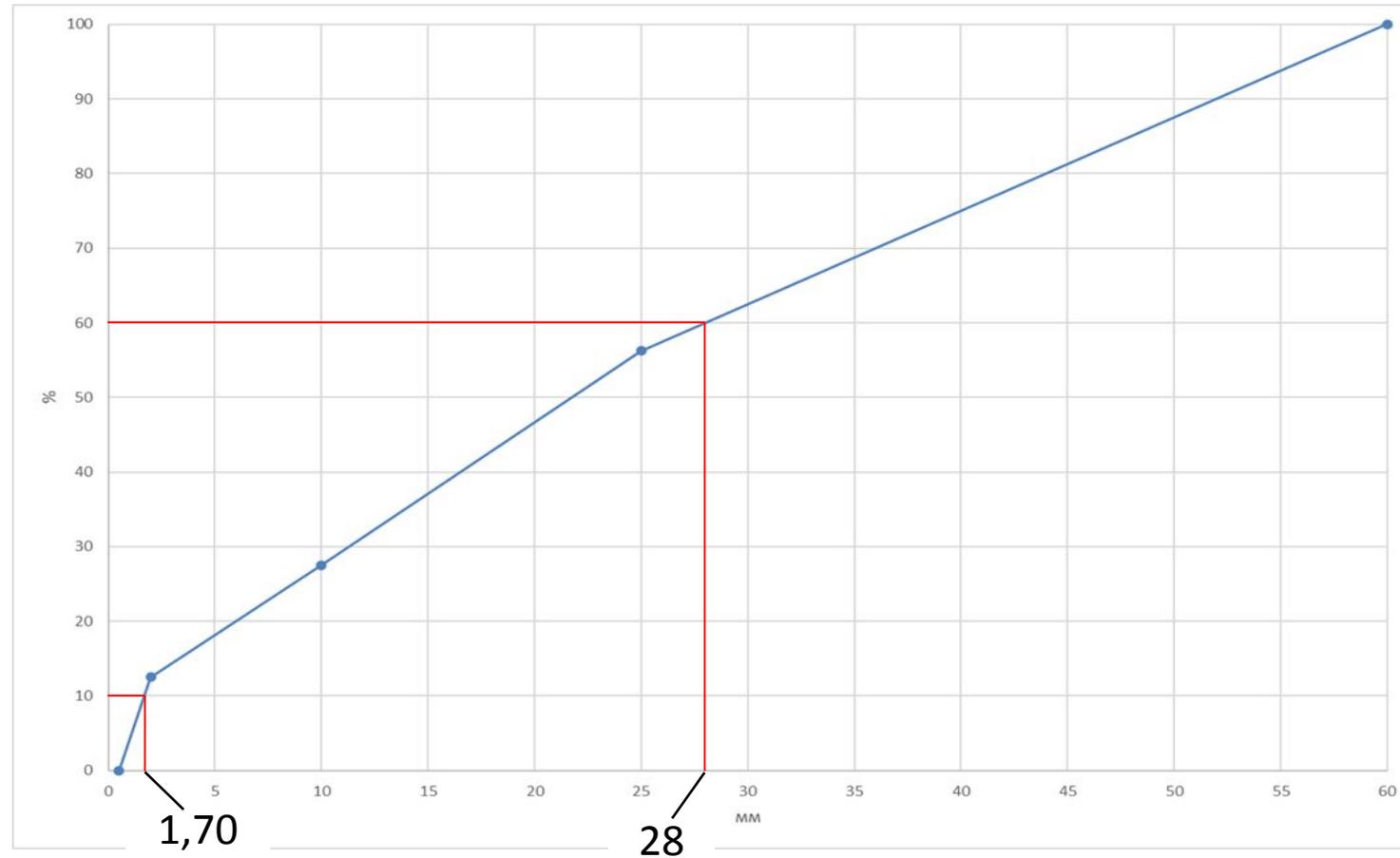
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. Произведем отсев фракции 0,5-0,25 мм.

После отсева фракций необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянная фракция составляла 8% от всего состава обратного фильтра. После ее отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-8)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	60-25	25-10	10-2	2-0,5
Содержание, %	$40 \cdot 100 / (100 - 8) = 44$	$26 \cdot 100 / (100 - 8) = 29$	$14 \cdot 100 / (100 - 8) = 15$	$12 \cdot 100 / (100 - 8) = 13$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-ф}$ и $d_{10-ф}$

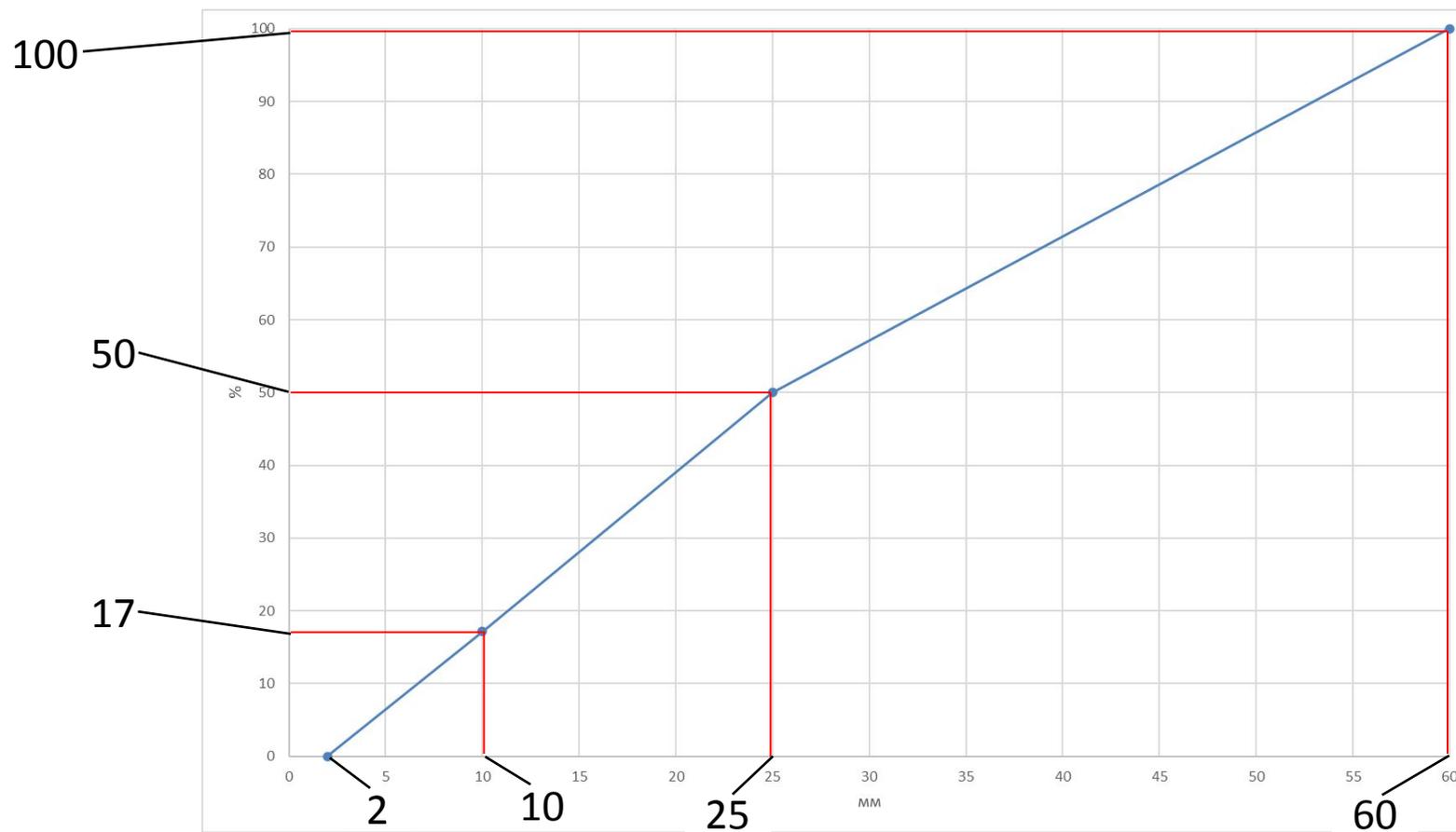


$$C_{U-ф} = \frac{28}{1,70} = 16,5 > 8$$

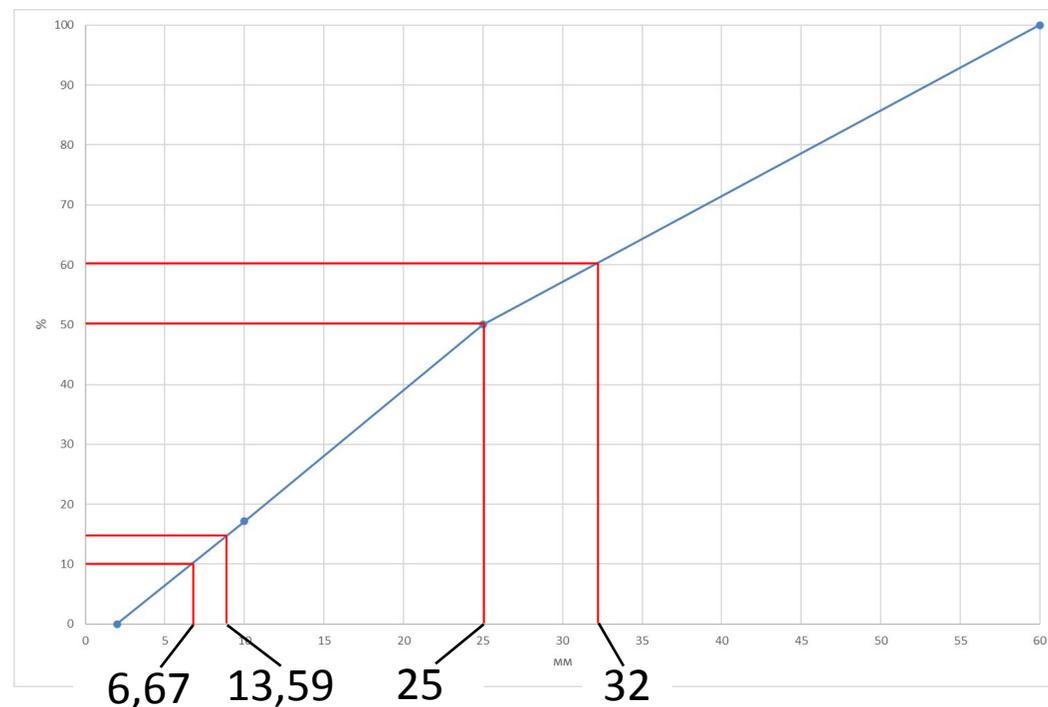
Условие не выполняется, поэтому необходимо произвести отсев фракций. Произведем отсев фракции 2-0,5 мм.

После отсева фракций необходимо пересчитать процентное соотношение оставшихся фракций и построить новую кривую гранулометрического состава. Отсеянная фракция составляла 13% от всего состава обратного фильтра. После ее отсева состав оставшихся фракций увеличивается на величину $100/(100-13)$. Таблица гранулометрического состава грунта для обратного фильтра выглядит следующим образом

Диаметр частиц, мм	60-25	25-10	10-2
Содержание, %	$44 * 100 / (100 - 13) = 50$	$29 * 100 / (100 - 13) = 33$	$15 * 100 / (100 - 13) = 17$



По кривой гранулометрического состава необходимо найти величины $d_{60-\phi}$ и $d_{10-\phi}$



$$C_{U-\phi} = \frac{32}{6,67} = 4,8 < 8$$

Условие выполняется, проверяем оставшиеся условия.

$$b \leq 0,6 * d_{25-\phi}$$

$$6 \text{ мм} < 0,6 * 13,59 \text{ мм} = 8,15 \text{ мм}$$

$$d_{50-\phi} \leq 10 * d_{50-\Gamma}$$

$$25 \text{ мм} > 10 * 0,12 \text{ мм} = 1,2 \text{ мм}$$

Условие на границе «грунт насыпи-обратный фильтр» не выполняется. Чтобы исключить вымывание грунта из тела насыпи, необходимо устройство слоя геотекстиля между грунтом насыпи и обратным фильтром.

Толщина обратного фильтра определяется из условия

$$\delta_{\phi} \geq 4 * d_{50-\phi}$$

$$\delta_{\phi} \geq 4 * 25 \text{ мм} = 100 \text{ мм}$$

Минимальная толщина фильтра $\delta_{\phi}^{min} = 0,1 \text{ м}$. Окончательно принимаем толщину фильтра $\delta_{\phi} = 0,1 \text{ м}$.

