

**Тема РАСЧЕТ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ГИДРОСМЕСИ
РАЗМЫТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ДРЕНАЖНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ**

Цель занятия. Расчет скоростного режима транспортировки гидросмеси размываемых отложений в дренажных трубопроводах

Методическое обеспечение.

1. Техническая эксплуатация закрытой мелиоративной сети: монография/ Н.Н. Погодин [и др.]; Национальная академия наук Беларуси, Институт мелиорации.–Минск: Беларуская навука, 2022.–154 с.

2. Пособие Инновационные.....

Содержание задания и методические рекомендации

При размыве отложений грунта, находящихся в полости дренажного трубопровода, струями воды, исходящими из насадки дренажно-промывочного устройства, образуется так называемая пульпа – смесь воды и частиц грунта.

Перемещение пульпы по дренажному трубопроводу под действием водяного потока можно представить как безнапорное и напорное гидротранспортирование двух разных потоков. Двухфазные потоки характеризуются тем, что в воде находятся во взвешенном состоянии твердые частички грунта.

При проектировании сетей в коммунальном хозяйстве критические скорости называются также самоочищающимися или незаилающими и являются минимально допустимыми.

Профессор А.Ф. Федоров для определения минимальной незаилающей скорости предложил следующую формулу

$$V_n = A\sqrt[n]{R}, \quad (27)$$

где $A = 1,57$;

$n = 3,5 + 0,5 R$;

R – гидравлический радиус, м.

В таблице 1 приведены значения минимальной незаилающей скорости, определенной по формуле А.Ф. Федорова в полностью заполненных водой дренажных трубопроводах при расположении в них промывочного рукава диаметром 28 мм и расчетных значениях гидравлического радиуса.

Определить минимальную незаилающую скорость можно также по формуле С.В. Яковлева.

$$V_{\min} = 12,5\omega_0 R^{0,2}, \quad (28)$$

где ω_0 – гидравлическая крупность частиц песка, м/с;

R – гидравлический радиус, м.

В данной формуле приведен такой показатель, как гидравлическая крупность частиц песка, которая в свою очередь зависит от их диаметра.

Минимальная незаилающая скорость согласно формуле (28) для трубопроводов диаметром 75...125 мм, при условии расположения в них напорного промывочного рукава диаметром 28 мм, приведена в таблице 2.

Т а б л и ц а 1 – Значения минимальной незаиляющей скорости в дренажных трубопроводах диаметром 75...125 мм при их наполнении $h/d = 1$ и расположении напорного рукава диаметром 28 м

Диаметр трубопровода, мм		
75	100	125
Гидравлический радиус, м		
0,012	0,018	0,024
Минимальная незаиляющая скорость, м/с		
0,44	0,50	0,54

Т а б л и ц а 2 – Расчетные значения минимальной незаиляющей скорости в дренажных трубопроводах диаметром 75...125 мм при их наполнении $h/d = 1$ и расположении напорного рукава диаметром 28 мм

Диаметр частиц, мм	Гидравлическая крупность, м/с	Диаметр трубопровода, мм		
		75	100	125
		Гидравлический радиус, м		
		0,012	0,018	0,024
		Минимальная скорость, м/с		
0,25	0,027	0,14	0,15	0,16
0,65	0,073	0,37	0,41	0,43
1,75	0,139	0,71	0,78	0,82

Выше приведенные формулы предназначены для расчета наружных канализационных сетей. Диаметр данных сетей обычно составляет от 150 мм и более. Определение минимальной незаиляющей скорости по формуле (5.27) при диаметре трубопровода 150 мм составит:

$$V_n = 1,57^{3,52} \sqrt[3]{0,0375} = 0,62 \text{ м/с.}$$

Минимальная незаиляющая скорость определенная по формуле (5.28) при диаметре трубопровода 150 мм для фракций песка среднего составит

$$V_{\min} = 12,5 \times 0,073 \times 0,0375^{0,2} = 0,47 \text{ м/с.}$$

Во избежание заилиения канализационных сетей минимальная расчетная скорость бытовых и дождевых сточных вод при наполнении труб $h/d = 0,6$ и их диаметре 150-250 мм принимается 0,7 м/с [2].

Анализируя вышеизложенные расчеты, можно сделать вывод, что и для очистки размываемых отложений в дренажных трубопроводах, в зависимости от их диаметров, минимальная критическая скорость движения пульпы должна составлять не менее 0,45 – 0,55 м/с.

Интенсивность размыва и скорость перемещения наносов в дренажных трубопроводах определяется, с одной стороны, величиной скорости потока, которая зависит от уклонов дренажных линий, внутренней шероховатости труб и степени их наполнения, с другой – крупностью частиц отложившихся наносов.

Для определения критических средних скоростей потока в гончарных трубах К.Ф. Александров предложил эмпирическую зависимость размыва песчаных фракций диаметром 0,1...0,25 мм [2].

$$V_{кр} = \frac{0,208d^{0,05}}{0,68 \left(\frac{h}{D} \right) - \frac{h}{D} + 1} \quad (29)$$

где D – внутренний диаметр труб, м;

h – высота наполнения, м;

d – диаметр частиц песка, м.

В данной формуле скорость ($V_{кр}$) соответствует началу перемещения песчаных гряд и, при наполнении трубопровода $h/d = 1$, диаметре фракции песчаных частиц 0,1 мм, составляет:

$$V_{кр} = \frac{0,208 \times 0,0001^{0,05}}{0,68 - 1 + 1} = 0,19 \text{ м/с}$$

При диаметре фракции песчаных частиц 0,25 мм:

$$V_{кр} = \frac{0,208 \times 0,00025^{0,05}}{0,68 - 1 + 1} = 0,20 \text{ м/с.}$$

По наблюдению ряда авторов [2], при скорости потока 0,2 м/с, наблюдается движение мелкозернистых частиц преобладающих в отложениях дренажных трубопроводов. При движении данных отложений по трубопроводу образуются крупные песчаные гряды, что приводит к увеличению гидравлических сопротивлений и уменьшению транспортирующих способности потока. Исследованиями Б.И. Блажиса установлено, что удаление песчаных отложений из дренажных трубопроводов диаметром 100 мм при скорости потока 0,2 м/с и расчётных или близких к ним весенних расходов осуществляется на протяжении 22 - 27 суток. Следовательно, формула К.Ф. Алеханда не может быть использована для расчёта критических скоростей при гидродинамическом способе очистки.

В формулах профессора К.Ф. Фёдорова и С.В. Яковлева отсутствует такой важный показатель как объемная концентрация (консистенция) пульпы, которая определяет содержание размытых частиц в объеме транспортируемой воды. В связи с данным положением, для расчёта критических скоростей в дренажных трубопроводах наиболее соответствуют формулы, используемые при гидротранспорте грунтовых смесей.

Для расчёта критической скорости, при напорном гидротранспорте различных материалов применяются формулы В. Дюрана, А.М. Царевского, Н.А. Силина и др. Однако данные формулы каждый автор выводил применительно к тем или иным конкретным условиям (диаметр трубопровода, вид грунта или иных материалов, размер фракции и пр.), в связи с чем и результаты расчёта скоростей существенно отличаются между собой. Так Б.Е. Романенко, приводивший сравнительные расчёты определения критической скорости, установил, что её значения, полученные по формулам различных авторов, отличаются до 5 раз. [2].

Для установления формулы, которую возможно использовать при расчёте критической скорости в дренажных трубопроводах, произвели сравнительный расчёт критической скорости по формуле Р. Дюрана, которая приведена в инструкции по гидравлическому расчету напорного гидротранспорта грунтов и применяется для расчета гидравлического транспорта грунтов средневзвешенной крупностью $d_0 = 0,25 \dots 70$ мм, при $d_0 / D \leq 0,15$; формуле А.М. Царевского, используемой для расчета гидротранспорта грунта по пульпопроводам малых и средних диаметров, а также по формуле, приведенной в пособии по проектированию гидравлического транспорта и предназначенной для гидротранспорта грунтов и нерудных материалов крупностью 0,03...0,3 мм, а также золы и шлака тепловых электростанций крупностью 0,025...10 мм.

Обширные экспериментальные исследования по гидротранспорту однородных материалов были приведены Р. Дюраном в Гренобле. В качестве транспортируемой части использовался в основном однородный песок крупностью 0,2, 0,44 и 2,0 мм при диаметре трубопро-

водов 104, 150, 253 и более мм. Критическая скорость для транспортировки данных фракций песка была представлена в следующем виде :

$$V_{кр} = 8,3\sqrt[3]{D^6 C_0 \Psi}, \quad (30)$$

где: D – диаметр трубопровода, м
 C_0 – объемная концентрация гидросмеси;
 Ψ – коэффициент транспортабельности.

Объемная концентрация гидросмеси определяется по формуле :

$$C_0 = \frac{\gamma_{см} - \gamma_в}{\gamma_T - \gamma_в}, \quad (31)$$

где $\gamma_{см}$ – плотность гидросмеси (пульпы), т/м³;

$\gamma_в$ – удельный вес воды, т/м³;

γ_T – удельный вес грунта, т/м³.

Плотность гидросмеси (пульпы) определяется по формуле:

$$\gamma_{см} = \frac{n\gamma_в + \gamma_T(1-m)}{n + (1-m)}, \quad (32)$$

где n – удельный расход воды на транспортирование 1 м³ твёрдого материала в массиве, м³/м³;

m – пористость грунта.

В свою очередь пористость грунта определяется по следующей формуле:

$$m = \frac{\gamma_T - \gamma_с}{\gamma_T}, \quad (33)$$

где $\gamma_с$ – плотность грунта в естественном сложении (объемный вес скелета грунта), т/м³.

В дальнейших сравнительных расчетах критическая скорость определялась для транспортировки гидросмеси песчаных отложений. Плотность песчаных отложений принята 1,32 т/м³ (в ранее выполненных исследованиях плотность песчаных отложений в дренажных трубопроводах составляла 1,19...1,35 т/м³).

При вычислении плотности гидросмеси, удельный расход воды на транспортировку 1 м³ твердого материала принят 7 м³. Расчётные значения основных показателей гидротранспорта песчаных отложений определённые по формулам (31...33) и приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3– Расчётные значения основных показателей гидротранспорта песчаных отложений

Вид отложений	Удельная масса, т/м ³	Плотность, т/м ³	Пористость	Плотность гидросмеси, т/м ³	Объемная концентрация
Песчаные	2,66	1,32	0,50	1,11	0,066

Коэффициент транспортабельности Ψ , приведенный в формуле (5.30) зависит от гидравлической крупности частиц грунта (таблица 4).

Т а б л и ц а 4 – Коэффициент транспортабельности Ψ в зависимости от фракций частиц грунта

Фракция грунта,	0,05-0,10	0,10-0,25	0,25-0,50	0,50-1,0	1,0-2,0	2,0-3,0	3,0-5,0
Ψ	0,02	0,20	0,40	0,80	1,2	1,5	1,8

Критические скорости транспортировки пульпы при фракциях песчаных частиц 0,05...0,10 и 0,1...0,25 мм определенные по формуле (5.30), приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5 – Критическая скорость транспортировки гидросмеси песчаных отложений в дренажных трубопроводах диаметром 75...125 мм

Вид отложений	Диаметр трубопровода, мм					
	75		100		125	
	Фракции грунта, мм					
	0,05-0,10	0,10-0,25	0,05-0,10	0,10-0,25	0,05-0,10	0,10-0,25
Критическая скорость, м/с						
Песчаные	1,15	1,71	1,26	1,87	1,37	2,03

Для расчёта критической скорости гидротранспорта грунта по пульпопроводам малых и средних диаметров используют формулу А.М. Царевского.

$$V_{кр} = 32\sqrt{D^3(\gamma_n - 1)\omega_0\alpha}, \quad (34)$$

где D – диаметр трубопровода, м;

ω_0 – осредненная гидравлическая крупность частиц, м/с;

γ_n – плотность пульпы, т/м³;

α – осредненная крупность фракций от 0 до 80 % состава грунта, мм.

В свою очередь значение (α) определяется по формуле:

$$\alpha = \left[\frac{d_{0-80}}{(0,5d_{cp} + 0,8)d_{cp}} \right]^{0,2}$$

Для расчёта примем исходные данные: фракция частиц песка 0,1...0,25 мм при среднем значении $d_{cp} = 0,18$ мм; гидравлическая крупность частиц $\omega_0 = 0,017$ м/с, плотность гидросмеси – 1,11 т/м³; диаметр трубопровода 75 мм.

$$\alpha = \left[\frac{0,14}{(0,5 \times 0,18 + 0,8)0,18} \right]^{0,2} = 0,97$$

Определим критическую скорость по формуле (5.34):

$$V_{кр} = 32\sqrt{0,075^3(1,11-1) \times 0,017 \times 0,97} = 1,07 \text{ м/с}$$

Как следует из вышеизложенного, критическая скорость, вычисленная по формуле Р. Дюрана, в 1,6 раза превышает скорость, определенную по формуле А.М. Царевского.

В пособии по проектированию гидравлического транспорта формула расчёта критической скорости приведена в следующем виде:[2]

$$V_{кр} = 4,9S^{0,36} \left(\frac{\sqrt{gD}}{\sqrt[4]{C_\phi}} \right), \quad (35)$$

где S – объемная концентрация гидросмеси;

g – ускорение свободного падения м/с²;

D – диаметр трубопровода, м;

C_ϕ – коэффициент лобового сопротивления (коэффициент сопротивления частиц различного грунта при свободном падении в воде).

Гидравлические расчёты в данном пособии проводится в следующем порядке. По заданному гранулометрическому составу материала определяется значение коэффициента транспортабельности Ψ_i , для каждой фракции грунта (таблица 6).

Т а б л и ц а 6 – Коэффициент транспортабельности Ψ_i в зависимости от фракции частиц грунта

Размер фракций,	Ψ_i	Размер фракций,	Ψ_i	Размер фракций,	Ψ_i
40 - 80	1,7	5 - 7	1,9	0,5 - 1	0,75
20 - 40	1,8	3 - 5	1,75	0,25 - 0,5	0,40
10 - 20	2	2 - 3	1,5	0,1 - 0,25	0,10
7 - 10	1,95	1 - 2	1,2	0,1	0,02

По найденному значению Ψ_i определяется величина C_φ , так для Ψ_i равным 0,1 значение C_φ составляет 21,7; при $\Psi_i = 0,4$ значение – $C_\varphi = 3,41$.

Для расчета критической скорости определяемой по формуле (5.35) применим исходные данные, используемые в таблицах 5.14 и 5.17, а именно: объемная концентрация гидросмеси $S = 0,066$; диаметр трубопровода $D = 0,075$ м; размер фракций 0,1–0,25 ($\Psi_i = 0,1$; $C_\varphi = 21,7$); размер фракций 0,25–0,5 ($\Psi_i = 0,4$; $C_\varphi = 3,41$). Критическая скорость транспортировки пульпы по дренажному трубопроводу диаметром 75 мм, вычисленная по формуле (5.35) при размере фракций 0,1-0,25 составляет 0,73 м/с; а при фракциях 0,25-0,5 мм – 1,87 м/с.

В Пособии к СНиП не приводятся данные значения C_φ при коэффициенте Ψ_i равному 0,02. Учитывая выше приведенное соотношение коэффициента Ψ_i по фракциям 0,1–0,25 и 0,1 мм (таблица 5.17) которое составляет 5, можно предположить, что и коэффициент C_φ при Ψ_i равном 0,02 будет составлять 108,5.

Данное предположение подтверждается расчетами по формуле профессора Р. Дюрана при значениях коэффициента транспортабельности, приведенного в таблице 5.15. Критическая скорость, вычисленная по данной формуле с уменьшением фракций грунта с 0,1–0,25 до 0,05–0,1 мм уменьшилась в 1,49 раз (таблица 5.16). Расчет по формуле (5.35) показывает, что критическая скорость, определенная при коэффициенте C_φ равном 108,5 по сравнению со скоростью, определенной с коэффициентом 21,7 уменьшилась в 1,49 раза, что совпадает со сравнительными данными, вычисленными по формуле (5.30), т.е. предположение об увеличении коэффициента C_φ в пять раз довольно верно.

Определим критическую скорость при значении фракций 0,05–0,1 мм и коэффициенте $C_\varphi = 108,5$:

$$V_{кр} = 4,9 \times 0,066^{0,36} \left(\frac{\sqrt{9,81 \times 0,075}}{\sqrt[4]{108,5}} \right) = 0,50 \text{ м/с.}$$

Анализируя расчет критической скорости по выше приведенным формулам, можно сделать вывод, что скорость, приведенная в Пособии к СНиП, наиболее подходит для расчета дренажных трубопроводов, так как предназначена для гидравлического транспорта фракций материалов, в том числе при их размере 0,025... 0,25 мм, которые наиболее часто встречаются в отложениях дренажных трубопроводов.

Рассчитаем критическую скорость транспортировки размытых песчаных отложений в дренажных трубопроводах диаметром 75...125 мм, при размере частиц грунта 0,05–0,1; 0,1–0,25 и 0,25–0,5 мм и удельном расходе воды 6–18 м³ по формуле (5.35).

Плотность песчаных отложений примем 1,27 т/м³, как среднее значение плотности песчаных отложений 1,19...1,35 т/м³, ранее установленное при очистке дренажных трубопроводов.

Расчетные значения основных показателей гидротранспорта песчаных отложений, определенные по формулам 5.31...5.34 удельном расходе воды 6...18 м³ приведены в таблице 5.18 приложения 2 [2].

Зависимости плотности и концентрации гидросмеси песчаных отложений от удельного расхода воды, а также зависимость плотности гидросмеси от ее объемной концентрации приведена на рисунках 1–3.

Движение гидросмеси отложений (пульпы) при промывке дренажных труб происходит в стесненном сечении дренажной трубы. Стеснение обусловлено наличием в трубопроводе напорного водоподающего рукава (d_p) диаметром 28 мм.

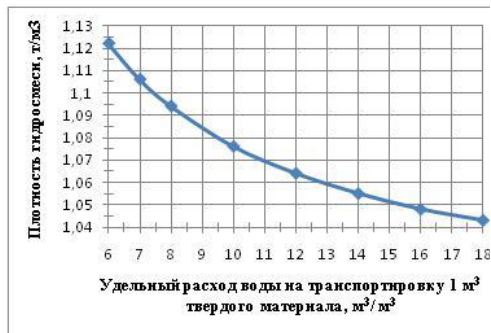


Рисунок 1 – Зависимость плотности гидросмеси песчаных отложений от удельного расхода воды

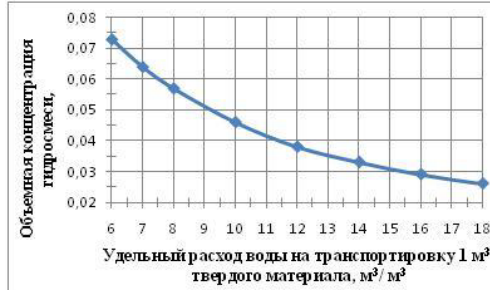


Рисунок 2 – Зависимость объемной концентрации гидросмеси песчаных отложений от удельного расхода воды

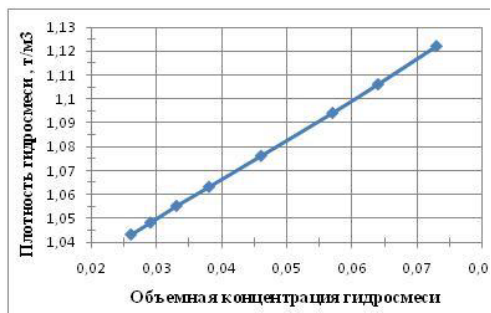


Рисунок 3 – Зависимость плотности транспортируемой по трубопроводу гидросмеси песчаных отложений от объемной концентрации

С учетом расположения водоподающего рукава расчетный эквивалентный диаметр ($D_э$) трубопровода можно определить по следующей зависимости:

$$D_э = (D^2 - d_p^2)^{1/2}, \quad (36)$$

где: D – диаметр трубопровода, м; d_p – диаметр водоподающего рукава, м.

При диаметре трубопроводов 75, 100 и 125 мм их эквивалентный диаметр соответственно составит 70, 96 и 122 мм. Поэтому ниже приведенные расчеты по определению критической скорости гидротранспорта размытых отложений выполнены с учетом эквивалентных диаметров трубопроводов.

Критическая скорость транспортировки гидросмеси песчаных отложений в трубопроводах диаметром 75...125 мм в зависимости от размера частиц песка и удельного расхода воды на их транспортировку, вычисленная по формуле (5.35) приведена в таблицах 5.19...5.21 приложения 2 и на рисунках 4...5.

Лабораторными исследованиями, выполненными в БелНИИМ и ВХ по гидротранспорту песчаных отложений с размером фракций более 0,20 мм в дренах диаметром 50 мм было установлено, что при плотности гидросмеси 1,05 критическая скорость составляет порядка 0,8 м/с.

Выполним расчет критической скорости гидросмеси песчаных отложений при ее плотности 1,05. Согласно рис. 5.8, при плотности 1,05, объемная концентрация составляет 0,03. Расчет выполняем по формуле (5.35) при размере фракций песчаных частиц 0,25...0,5 мм:

$$V_{кр} = 4,9 \times 0,03^{0,36} \left(\frac{\sqrt{9,81 \times 0,05}}{\sqrt[4]{3,41}} \right) = 0,73 \text{ м/с}$$

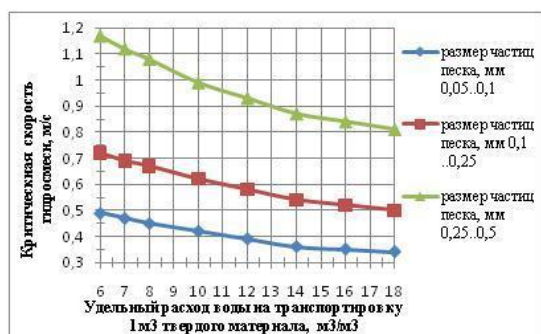


Рисунок 4 – Критическая скорость транспортировки гидросмеси песчаных отложений в трубопроводе диаметром 75 мм в зависимости от размера частиц песка и удельного расхода воды на их транспортировку

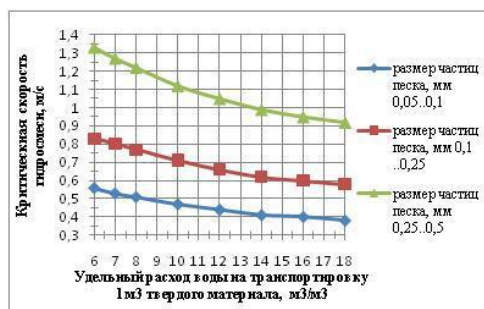


Рисунок 5 – Критическая скорость транспортировки гидросмеси песчаных отложений в трубопроводе диаметром 100 мм в зависимости от размера частиц песка и удельного расхода воды на их транспортировку

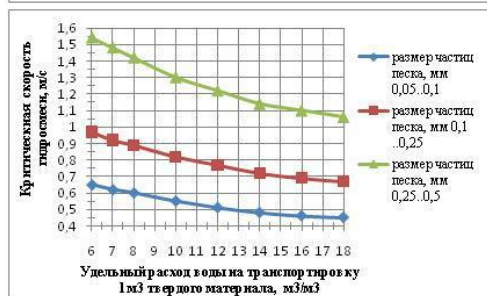


Рисунок 6 – Критическая скорость транспортировки гидросмеси песчаных отложений в трубопроводе диаметром 125 мм в зависимости от размера частиц песка и удельного расхода воды на их транспортировку

Значения критической скорости, полученные в лабораторных условиях и рассчитанные по формуле (35) отличаются весьма незначительно. Следовательно, выбранная формула для расчета критической скорости транспортировки пульпы вполне подходит для расчета дренажных трубопроводов при гидродинамическом способе их очистки и в дальнейшем была подтверждена при проведении лабораторных и полевых исследований.