

Выскребенцев В.С., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ И ВЯЗКИЕ ИХ СВОЙСТВА

vovagjan@mail.ru

В статье рассматривается сопротивление материалов, их уплотняемость и эффективность применения уплотнителей, а также влияние относительной плотности на вязкость и устойчивость структуры. Уделяется внимание циклам опытов, при различных влажностях для уплотнения суглинистого материала. Выявлено, что при оптимальных влажностях и толщинах слоев достигается плотность грунта 0,98...1,0 от плотности стандартного уплотнения. Получены значения максимальных вертикальных напряжений в нижней части уплотняемого слоя. Установлено, что наиболее интенсивно изменяются свойства глинистых, менее – песчаных. Для песчаных наиболее эффективным средством является увеличение уплотняющих нагрузок. Уплотнение грунта происходит под воздействием суммарного импульса, который возрастает от прохода к проходу, причем более интенсивно для супесей, чем для суглинков.

**Ключевые слова:** вязкие свойства, структура, дорожная одежда, суглинистый грунт, плотность грунта, уплотняющие нагрузки, импульс воздействия.

Для уточнения числа проходов грунтоуплотняющих машин по грунту, плотность грунта в сухом состоянии и оптимальной его влажности, времени уплотнения, минимального расстояния от уплотняющих механизированных средств до строительных конструкций, необходимо выполнять опытные уплотнения грунта непосредственно на строительной площадке [1, 2]. Основной технологической операцией при строительстве земляного полотна является послойное уплотнение грунтов [3, 4]. Сопротивление материалов определяет их уплотняемость и эффективность применения уплотнителей.

С увеличением относительной плотности коэффициент вязкости вначале возрастает, потом уменьшается. Это объясняется тем, что при больших плотностях в грунтах формируется неустойчивая структура, которая при загрузке разрушается с образованием новых контактов и вытеснением из них слоев менее вязкой воды.

При больших влажностях ( $S_r \approx 1,0$ ) в начале процесса изменения плотности сухого грунта процесс протекает также по линии увеличения числа контактов. При малых и больших влажностях увеличение плотности сухого грунта происходит за счет сближения частиц, лишь при  $\rho_d > 1,45$  и  $S_r \approx 0,7$  начинает происходить процесс разрушения агрегатов и начинает уменьшаться вязкость.

Основной цикл опытов производился при влажностях суглинистого грунта, больше оптимальной по стандартному уплотнению (0,25), оптимальной (0,22) и меньшей (0,18). Для суглинка оптимальная толщина, при которой обеспечивается максимальная плотность после последнего (7-го) прохода, является: при влажности 0,25 – 0,20 м; 0,22 – 0,12 м; 0,18 – 0,11 м. Таким образом, опыты производились при толщине большей, равной и меньшей оптимальных (табл.1).

Таблица 1

Зависимость плотности сухого грунта от числа проходов катка

№ опытов	Тип грунта	Влажность $W$	Толщина слоя $H$ , м	Плотность сухого грунта $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup> , после проходов катка				
				0	1	3	4	5
1	суглинок	0,216	0,28	0,94	1,33	1,43	1,48	1,52
2		0,214	0,22	0,91	1,41	1,44	1,51	1,55
3		0,217	0,11	0,95	1,46	1,48	1,50	1,49
4	суглинок пылеватый	0,187	0,10	0,88	1,33	1,51	1,53	1,55
5		0,179	0,20	0,84	1,35	1,44	1,49	1,49
6		0,172	0,30	0,91	1,29	1,39	1,43	1,42
7	супесь	0,127	0,35	1,25	1,53	1,55	1,56	1,58
8		0,119	0,25	1,13	1,47	1,52	1,54	1,55
9		0,114	0,15	1,15	1,43	1,49	1,51	1,53
10	песок	0,042	0,30	-	-	-	1,33	1,40
11		0,047	0,20	-	-	-	1,27	1,38
12		0,049	0,10	-	-	-	1,25	1,37

При оптимальных влажностях и толщинах слоев были достигнуты плотности грунта 0,98...1,0 от плотности стандартного уплотнения, в других случаях несколько меньшие значения. При влажностях 0,22...0,24 и толщине слоя 10 см была достигнута плотность

сухого грунта меньше, чем при большей толщине, что объясняется развитием сдвигов и уплотнений. Значение максимальных вертикальных составляющих напряжений в МПа в нижней части уплотняемого слоя, по проходам тяжелого катка представлены в (табл. 2).

Таблица 2

**Зависимость вертикальных напряжений от числа проходов катка**

№ опытов	Проходы колеса катка			
	1	2	5	7
1	1,07	2,17	2,55	2,27
2	1,01	2,06	2,19	2,09
3	2,03	2,01	2,55	2,88
4	3,63	3,79	3,88	3,99
5	2,13	2,72	2,93	3,13
6	0,99	2,03	2,13	2,27
7	3,77	2,89	3,14	2,91
8	2,13	2,81	3,03	2,87
9	2,59	2,77	2,77	2,71
10	1,49	1,22	1,71	1,99
11	1,69	2,31	2,19	2,67
12	2,87	3,33	3,52	3,53

При уплотнении грунтов катками одновременно протекает два процесса – уменьшение толщины слоя и увеличение плотности сухого (скелета) грунта.

Первый процесс должен приводить к увеличению напряжения в нижней части слоя, второй – к уменьшению, вследствие возрастания слоя и увеличения распределяющей способности.

При уплотнении наиболее интенсивно изменяются свойства глинистых грунтов, менее интенсивно – песчаных. Это объясняется тем, что при уплотнении глинистых грунтов происходит два процесса – увеличение числа контактов между частицами и агрегатами грунта и качественные изменения самих контактов вследствие выжимания пленой связанной воды. При уплотнении песков развивается лишь первый процесс – увеличение контактов. Поэтому для глинистых грунтов повышение интенсивности уплотнения может быть достигнуто как увеличением уплотняющей нагрузки, так и увеличением времени их воздействия (числа проходов, уменьшения скорости укатки, увеличение площади контакта). Для песчаных грунтов наиболее эффективным средством является увеличение уплотняющих нагрузок.

Уменьшение толщины уплотняющего слоя является действенным средством увеличения эффективности уплотнения. Эффективность его больше для связных грунтов, чем для несвязных. Уплотняемость материалов, которые обладают вязкими свойствами, зависит от особенности

изменения уплотняющих воздействий во времени, которое можно характеризовать импульсом напряжений.

Импульс напряжений в МПа (площадь эпюры  $\sigma$  по проходам для низа) представлен в (табл. 3).

Учитывая характер изменения напряжений, можно отметить, что для связных грунтов уплотнение происходит при концентрации напряжений, для малосвязанных – при деконцентрации.

Уплотнение материала происходит под воздействием суммарного импульса, который возрастает от прохода к проходу, причем более интенсивно для супесей, чем для суглинка. С увеличением толщины импульс возрастает, с увеличением влажности – уменьшается.

При первом проходе импульсы очень близки при разных влажностях и толщине слоев. Это объясняется тем, что для толстых слоев уменьшение напряжений компенсируется временем их действия. В то же время разница в плотности при первом проходе довольно значительна.

Однако суммарный импульс является весьма удобным параметром для регулирования уплотнения в производственных условиях. Если максимальные уплотняющие нагрузки при заданной толщине слоя можно регулировать только за счет изменения нагрузки на колеса, что в ряде случаев затруднительно, то суммарный импульс сравнительно легко регулировать либо за счет изменения скорости укатки, либо за счет изменения числа проходов.

Таблица 3

## Изменение импульса напряжений от числа проходов катка

№ опытов	Проходы колеса катка				
	1	2	5	7	9
1	0,0554	0,0377	0,0371	0,033	0,042
2	0,0443	0,0485	0,0413	0,039	0,038
3	0,0388	0,0501	0,0322	0,027	0,031
4	0,0407	0,0337	0,0311	0,031	0,033
5	0,0573	0,0517	0,0533	0,049	0,052
6	0,0541	0,0477	0,0391	0,041	0,044
7	0,0393	0,059	0,0413	0,049	0,051
8	0,0417	0,054	0,0440	0,045	0,044
9	0,0388	0,033	0,0321	0,033	0,038
10	0,0309	0,042	0,043	0,042	0,048
11	0,0373	0,049	0,049	0,048	0,052
12	0,0283	0,031	0,031	0,035	0,038

Вязкие свойства при уплотнении проявляются в том, что эпюры нормальных составляющих напряжений асимметричны. Отношение площади эпюры на участке нагружки

к площади на участке разгрузки было названо коэффициентом асимметрии эпюры (табл. 4). Наибольшее влияние на этот коэффициент оказывает вязкость.

Таблица 4

## Зависимость коэффициента асимметрии эпюры от прохода колеса катка

№ опытов	Коэффициент асимметрии				
	Проходы колеса катка				
	1	2	5	7	9
1	1,39	1,27	0,96	1,09	1,13
2	1,37	0,99	0,87	1,08	1,09
3	1,35	0,93	0,83	0,97	1,03
4	1,03	0,97	0,97	0,88	0,97
5	1,37	0,81	0,83	0,87	0,89
6	0,93	0,79	0,78	0,93	0,99
7	1,013	0,89	0,88	0,93	0,95
8	1,053	0,73	0,77	0,81	0,88
9	1,051	0,81	0,95	0,90	0,93
10	1,37	0,72	0,88	0,97	0,99
11	1,13	0,93	0,68	0,74	0,81
12	1,10	0,88	0,75	0,97	0,72

Полученные результаты опыта показывают, что в подавляющем большинстве случаев при первом проходе этот коэффициент больше единицы, при последних – меньше. Этот вывод хорошо соответствует развиваемым представлениям о природе вязкого сопротивления. Оно проявляется вследствие нескольких причин: переноса количества движения, связанного с изменением плотности, переноса количества движения при зацеплении и сдвигах частиц и деформации пленок жидкой фазы при сближении частиц.

Анализ показывает, что эквивалентные модели деформации и упругости при качении пневматического колеса значительно больше, чем при статическом нагружении. Это

объясняется тем, что за время взаимодействия пневматического колеса с грунтом при качении деформации не успевают развиваться полностью. Это необходимо учитывать при расчете уплотнения.

Модули упругости на 20...50 % больше модуля деформации, если учесть, что модули упругости несколько завышены, т.к. время замера деформации они не успевают восстановиться полностью, то расхождение между ними окажется еще меньшим. Это свидетельствует о том, что уплотнение на этих проходах окончилось, и модули деформации и упругости близки друг к другу.

Для супеси значения коэффициента вязкости меньше, чем для связных грунтов. Это

объясняется меньшей дисперсностью грунта и меньшим влиянием водных пленок на его свойства.

С увеличением влажности значение коэффициента вязкости уменьшается. Это объясняется увеличением толщины водных пленок и тем, что деформируются менее прочные слои воды.

При организации уплотнения исследовалось влияние режимов уплотнения на его эффективность. Для проведения натурных испытаний, были отсыпаны площадки из

пылеватого суглинка с  $W_L = 0,325$  и пределом раскатывания  $W_p = 0,19$ . Толщина слоя рыхлого грунта составляла 0,45 м, начальная плотность сухого грунта 1,11...1,16 г/см<sup>3</sup>, влажность  $W = 0,17$ .

Первая площадка уплотнялась последовательными проходами катка ДУ-16 на I передаче; вторая – на II передаче. На третьей площадке первый проход был сделан на II передаче, последующие проходы – на III передаче. Результаты исследований представлены в (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость числа проходов катка от плотности сухого грунта

№ проходов	I передача			II передача			III передача		
	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$E_q, \text{МПа}$	$E_y, \text{МПа}$	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$E_q, \text{МПа}$	$E_y, \text{МПа}$	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$E_q, \text{МПа}$	$E_y, \text{МПа}$
0	1,13	-	-	1,14	-	-	1,12	-	-
1	1,47	3,6	4,0	1,44	4,3	4,0	1,45	3,6	3,9
3	1,66	4,0	17,5	1,71	3,9	21,5	1,67	4,2	11,5
5	1,71	3,9	39,0	1,70	4,4	31,0	1,71	4,3	19,5
7	1,75	5,0	41,0	1,72	4,5	39,0	1,73	4,1	21,0
9	1,74	4,9	40,0	1,75	4,6	37,0	1,75	4,5	23,0

При повышенных скоростях модули деформации и упругости меньше, чем при укатке на низших пределах. Это объясняется тем, что при пониженных скоростях уплотнения уменьшаются силы вязкости сопротивления, и деформируется более прочная структура грунта.

Этот эффект более сильно сказывается на изменении упругих свойств грунта, которые более чувствительны к особенностям развития структурообразования. Эффект увеличения прочности при уменьшении скорости укатки сказывается и при уплотнении малосвязанных грунтов.

Скорость изменения напряженно-деформированного состояния может изменяться также за счет снижения давления воздуха в шинах, т.к. увеличивается площадь контакта колеса с грунтом и время воздействия на материал. Однако, при этом снижаются и удельное давление, что уменьшает эффективность уплотнения.

Поэтому основным путем регулирования является уменьшение скорости укатки. С увеличением толщины слоя плотность грунта уменьшается, что становится особо ощутимым при давлении воздуха в шине 0,6 МПа, когда время воздействия на материал минимально. При давлении воздуха в шине 0,2 МПа разница является менее ощутимой, поскольку время воздействия максимально. Снижение давления воздуха в шинах уменьшает плотность грунта; чем меньше влажность грунта, тем меньше этот эффект. С уменьшением влажности

увеличивается вязкость системы. Поэтому можно ожидать, что снижение давления воздуха в шинах будет эффективно лишь для очень вязких материалов, у которых жидкая фаза представлена водой и битумом.

На основании полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- одним из основных путей повышения эффективности уплотнения грунтов является уменьшение скорости уплотнения на последних проходах. Если уплотнение грунтов производится при пониженных влажностях, то снижение давления воздуха в шинах может дать определенный положительный эффект.

- снижение давления воздуха в шинах позволяет уменьшить потребную силу тяги на первых проходах катка при укатке грунтов, влажность которых значительно больше оптимальной.

- увеличение числа проходов приводит к некоторому разуплотнению грунта вследствие разрушения верхних слоев под катком. Это заставляет строго ограничивать число проходов катка.

- для уплотнения слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов, которые обладают повышенной вязкостью, требуется увеличивать время воздействия уплотнителей путем увеличения число проходов, снижать давление воздуха в шине либо уменьшать скорость укатки на последних проходах.

- производительность и стоимость уплотнения зависят от числа проходов катков.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калачук Т.Г. Особенности уплотнения грунтов с коагуляционным типом структуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 51–53.

2. Калужный Я.А., Батраков О.Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1971. 157 с.

3. СП 78.13330. 2012. Автомобильные дороги. М.: Минрегион России, 2013. 67 с.

4. СП 34.13330. 2012. Автомобильные дороги. М.: Госстрой России, 2013. 107 с.

---

**Vyskrebentsev V.S.**

### THE REGULARITIES OF SOIL COMPACTION AND THEIR VISCOSITY PROPERTIES

*The article deals with structural performance of materials, their compression rate and the effectiveness of compactors application as well as influence of density index on viscosity and structural stability. The attention is paid cycle experiments, at various humidity for the compaction of loamy stuff. It was found out under which optimum moisture content and coating thickness the soil density reaches 0,98...1,0 of density conventional compaction. The are received the definitions of supreme pedimental tensions at the bottom of compacted layer. It was ascertained that the most intensively alters the internals loam, less and the intensively soils – sandy. Under the for sandy soils the most effective remedy is the increase of compact burdens. Soil compaction takes place under the summary impulse, which grows up from passage to passage, more intensively in fine sandy loam, than in clay loam.*

**Key words:** viscous behavior, structure, road revetment, loamy soil, consistency of the soil, compact burdens, impulse influence.

---

**Выскребенцев Владимир Сергеевич**, аспирант кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vovagjan@mail.ru