

УДК 622.25/26

С.В. Мазеин

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ ГРУНТА НА ТОННЕЛЬНОЙ ШИТОВОЙ ПРОХОДКЕ

Семинар № 2

Общая транспортная ситуация в Москве, осложнившаяся за последнее десятилетие, закономерно привела к появлению уже проложенных и интенсивно строящихся, крупнейших подземных транспортных объектов – трехполосных автодорожных тоннелей в Лефортово и Серебряном Бору. Тоннели таких размеров (диаметр 14,2 м) и протяженности (1,5-2,2 км) впервые сооружаются в нашей стране, тем более в черте города, где не допускаются значительные осадки поверхности [1]. Основное средство проходки – это не имеющий современной альтернативы по темпам строительства, работающий при бентонитовом пригрузе забоя, тоннелепроходческий механизированный щитовой комплекс (ТПМК) с выдвигающимся режущим ротором и трубопроводным транспортом грунта. Иногда встречающиеся обрушения грунта в забое и образование свода над тоннелем (перебор сечения) во время проходки щитом происходят при недостаточном давлении среды пригруза на забой. Данное явление наблюдается также при ослаблении сцепления между разнородными частями грунтового массива со значительной воздушной пористостью при больших потоках омывающей забой бентонитовой суспензии, при образующемся горизонтальном обнажении грунта над щитом и обделкой тоннеля. Внешними причинами обрушения

грунта и опускания земной поверхности могут стать внезапное изменение уровня грунтовых вод и геологических формаций, а также извлечение из забоя валунов и других включений, в том числе искусственного происхождения.

Актуальной задачей прогноза и поддержания безопасного состояния городской поверхности над тоннелем является непрерывный контроль объема породы, вынимаемой во время проходки, и воздушной пористости грунта. Современным решением вопроса повышения безопасности проходки стало внедрение системы непрерывного контроля выхода грунта, использующей сенсоры линейного перемещения гидроцилиндров щита и датчики объемного потока в трубопроводном транспорте. Щит с непрерывным контролем показателей вынимаемого при проходке грунта [2] работал в маловлажных и влажных песках, песках с суглинками, глинах с супесями.

В данной публикации, опираясь на практические данные проходки тоннелей в Серебряном Бору, освещены следующие вопросы:

- 1) описание методов объемного контроля выхода грунта на ТПМК;
- 2) принцип действия и характеристики используемых контрольных датчиков;
- 3) сравнительный анализ результатов методов объемного контроля.

1. Методы объемного контроля выхода грунта на ТПМК

На тоннелепроходческом комплексе диаметром 14,2 м широко используются датчики перемещения гидроцилиндров и объемного потока, показатели которых составляют около четверти всех показаний, считываемых и отражаемых компьютерной системой ТПМК через каждые 10 секунд. В конце каждого цикла проходки бортовым компьютером шита создаются и сохраняются файлы данных работы машины, как течения всего процесса, так и средних показателей за цикл, включающий проходку и монтаж кольца обделки длиной $L=2$ м [3].

Статистический метод анализа (по среднему) объемного количества вынутого грунта за цикл использует показатель среднего объема.

Средний объем вынутого грунта за цикл проходки можно рассчитать так:

$$V = (Q_2 - Q_1) \cdot T, \quad (1)$$

где V - средний объем вынутого грунта за цикл проходки, Q_1 и Q_2 - средние показатели значений входящего и выходящего потоков трубопроводного транспорта породы соответственно, T - время проходки, отсчитываемое с максимальной погрешностью 0,4 % от начала до конца выдвигания проходческих гидроцилиндров шита.

Теоретически вынимаемый объем массива V_t полностью зависит от геометрии шита (диаметр $D=14,2$ м, длина кольца $L=2$ м):

$$V_m = \pi D^2 / 4 = 316,6 \text{ м}^3 \quad (2)$$

Полученные значения объема отличаются от теоретически вынутого объема грунта (объема выработки) в массиве и зависят от характера породы, имеющей различные коэффициенты разрыхления (воздушную пористость) в массиве и разные фильтрационные свойства, а также от величины

фактического выдвигания групп шитовых гидроцилиндров и домкратов ротора, пропорциональной объему выработки для монтажа 1 кольца обделки.

Данный метод средних значений объема вынутого грунта за кольцо при всей своей простоте не работает в режиме реального времени, предусматривает расчеты вручную и сравнительный анализ объемов по завершении цикла проходки. При данном способе невозможно оперативно отследить динамику изменений характера грунта и показателей вынимаемого объема. Методом средних значений пользуются только по мере необходимости, чтобы, например, зарегистрировать факт нештатной ситуации при переборе породы из забоя (вывалы, просадки). После случая бесконтрольной выемки породы, приведшего к длительному простоему, в 2006 году на ТПМК была впервые установлена новая система *Muck Control*, непрерывно контролирующая объемный выход породы при текущем положении домкратов шита.

Метод ***Muck Control*** в процессе проходки каждого кольца отражает на экране визуализации ТПМК (рис. 1):

1 - усредненный показатель вынутого объема на последнем десятке колец,

2 - средние показатели вынутого объема за каждое из последних 10 колец,

3 - текущий график зависимости объемного выхода по формуле (1) от длины выдвигания проходческих домкратов на кольце проходки (каждые 10 с),

4 - усредненный график зависимости объемного выхода от длины выдвигания проходческих домкратов на последнем десятке колец (каждые 10 с).

Система *Muck Control* работает в режиме реального времени и позволяет сравнивать текущий объем выдачи грунта с показателями последних

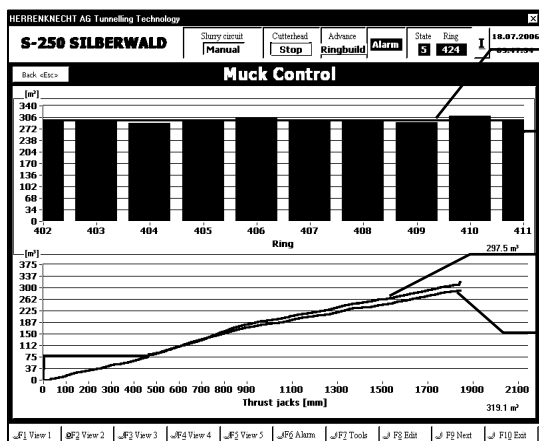


Рис. 1. Вид экрана визуализации Muck Control

1

2

3

4

принять соответствующие технологические меры. Данными этой системы можно пользоваться и для анализа воздушной пористости грунта на каждом цикле проходки.

Работу метода контроля средних значений объема (с использованием компьютерной системы ТПКМ) обеспечивают текущие по-

казатели измерителей потока, которые в конце цикла проходки усредняются, а для работы системы *Muck Control* к показателям потоков добавляются данные сенсоров линейного перемещения гидроцилиндров шита. Для оценки сущности и погрешности методов, для обоснования их использования необходимо рассмотреть работу первичной ступени контроля – датчиков, по отсчетам которых ведется расчет объемов.

колец, замечая скачки и скорость роста текущего графика объема при смене типа грунта. Алгоритм расчета объема каждые 10 секунд основан на разности выходящего и входящего потоков, причем отрицательная разность в целях сглаживания обнуляется. Кроме того, эта система высчитывает и сохраняет показатель *Auflockerungsfaktor des Bodens* (K_n), имеющий физический смысл доли воздушной пористости в объеме выработки массива и влияющий на осадку городской поверхности. Показатель выражается в процентах отношения объема воздушных пор V_n к объему выемки массива V_T :

$$K_n = 100 \cdot V_n / V_m = 100(V_m - V) / V_m \quad (3)$$

При этом стабильно высокое значение показателя воздушной пористости указывает на грунт, обладающий способностью к повышенным осадкам при проходке, а резкие минимумы его значения сигнализируют о переборе сечения тоннеля, вывалах грунта и водопритоке в забой.

Данная система контроля позволяет операторам проходки по непрерывным графикам следить за выходом грунта и при резких скачках объема выдачи останавливать проходку, чтобы

казатели измерителей потока, которые в конце цикла проходки усредняются, а для работы системы *Muck Control* к показателям потоков добавляются данные сенсоров линейного перемещения гидроцилиндров шита. Для оценки сущности и погрешности методов, для обоснования их использования необходимо рассмотреть работу первичной ступени контроля – датчиков, по отсчетам которых ведется расчет объемов.

2. Принцип действия и характеристики датчиков

2.1. Контроль объемного потока

На шите работают измерители объемного потока, установленные на питающем и транспортном трубопроводе бентонитового цикла. По ним можно судить о вынимаемых объемах грунта за время проходки (по разности подаваемого и выдаваемого потока).

Измерительный прибор *Promag* фирмы *Endress+Hauser* используется для измерения расхода электропроводящих жидкостей в закрытых трубопроводах с использованием принципа электромагнитной индукции. Прибор установлен на питающем и транспортном потоках трубопроводного контура для бентонитового раствора, имеющего достаточную мини-

мальную удельную электропроводность для работы данного расходомера. Стандартное отклонение измеряемого значения составляет +/- 0,5 %, но на данном ТПМК установлен прибор с минимально возможной погрешностью измерений за счет более тонкой регулировки преобразователя (отклонение измеряемого значения +/- 0,2 %).

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, при помещении проводника в магнитное поле индуцируется напряжение. При измерениях, основанных на принципе электромагнитной индукции, роль проводника здесь играет движущаяся среда, то есть поток бентонитового раствора, в том числе с транспортируемым в нем грунтом. Величина индуцированного напряжения пропорциональна скорости потока, при этом соответствующий сигнал через два измерительных электрода подается на измерительный усилитель. Объемный расход среды рассчитывается исходя из поперечного сечения трубопровода.

Внутри корпуса измерительного преобразователя системы находятся микропереключатели, при помощи которых может производиться настройка приборов по 6 параметрам. Высокая точность измерений обеспечивается при скоростях потока от 10 мм/с до 10 м/с.

Индукционные измерители объемного расхода устанавливаются на входящем и на отходящем потоках. Рабочий объемный расход находится в диапазоне 1500-3000 м³/час. По разнице их показаний с разрешением 3-6 м³/час (при выходе грунта 100-200 м³/час) оценивается объем выдаваемого грунта за время подвижки щита при цикле проходки (через 10-секундные интервалы, через усредненные показатели потоков за цикл). Точность измерения объема грунта

улучшается: при больших значениях отходящего потока и малых значениях входящего потока; при минимуме времени проходки, обеспечивающем максимальный поток грунта; при минимальной воздушной пористости грунта в массиве, когда за цикл проходки измеряется максимально приближенный к объему выработанного пространства объемное количество породы.

2.2. Контроль линейного перемещения гидроцилиндров

Для более точного и непрерывного контроля выдачи грунта необходимо наблюдать за продольным перемещением штоков шитовых и роторных домкратов. Для этого служат датчики линейного перемещения, встроенные в один из каждой группы гидроцилиндров. Эти гидроцилиндры перемещают щит и обеспечивают движение ТПМК при проходке.

В сенсорах линейного позиционирования производства компании "MTS-Sensors", применяющихся на шитовых домкратах ТПМК, используется физический феномен магнитострикции (рис. 2). Сердцем датчика является ферромагнитный измерительный элемент - волновод. Подвижный позиционирующий постоянный магнит (на поршне домкрата) наводит в волноводе магнитное поле. Движущийся в волноводе токовый импульс вызывает возникновение второго магнитного поля в направлении, радиальном к волноводу. В момент измерения встретившиеся друг с другом магнитные поля вызывают возникновение торсионного импульса. Этот импульс в виде материальной звуковой волны движется с постоянной ультразвуковой скоростью от точки измерения к концу измерительного элемента, где расположена сенсорная приемная головка. С помощью этой головки принятый сигнал преобразуется

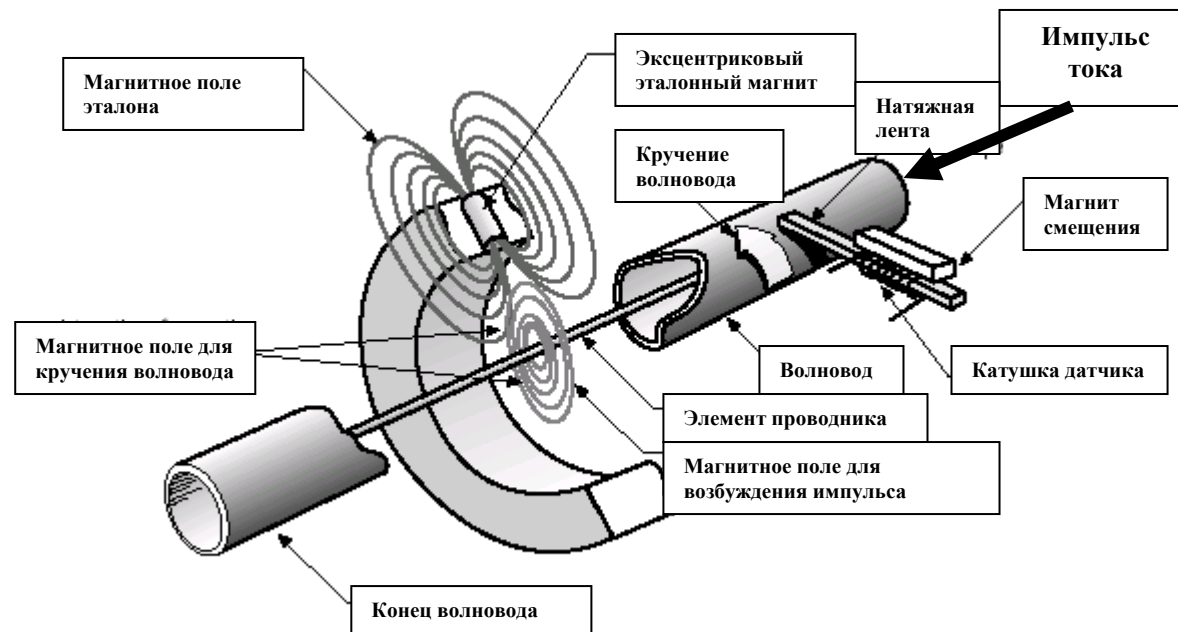
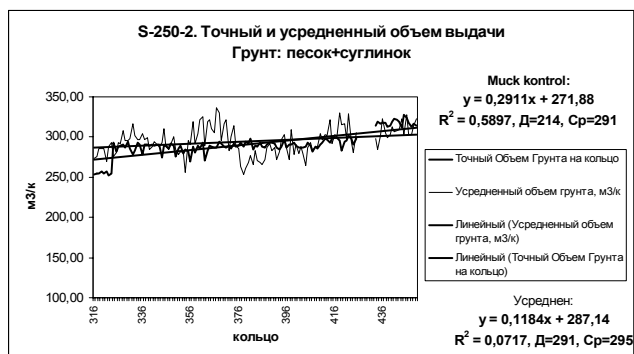


Рис. 2. Принцип магнитоэлектрики в системе измерения хода

Рис. 3. Изменение объема выдачи грунта в зависимости от номера кольца, рассчитанное двумя способами



в пропорциональный пути выходной сигнал, то есть измерения расстояния проводятся по времени прохождения ультразвукового сигнала по волноводу: от точки возбуждения (на поршне) до точки приема (на торце гидроцилиндра).

Поскольку подвижный магнит устанавливается на движущейся части, то он перемещается на штоке гидроцилиндра во время проходки. Подача импульса на волновод происходит через 10-секундные промежутки времени, то есть через стандартные интервалы отслеживания всех показателей на ТПМК. Поэтому изменяющиеся показатели хода всех шитовых гидроцилиндров, фиксирующиеся магнито-стрикционной системой измерения хода, можно связать графиком с другими данными шита в каждый момент времени измерения и по ним рассчитать, к примеру, теоретический объем выемки грунта за 10-секундный интервал измерений.

Датчики линейного перемещения гидроцилиндров ТПМК позволяют измерять ход штоков в диапазоне от 0 до 2500 мм со стандартным разрешением до 0,1 мм. При этом погрешность измерения объема выработанного пространства на данном ТПМК составляет $0,0158 \text{ м}^3$.

3. Сравнительный анализ результатов методов объемного контроля

Сравнительный анализ полученных результатов по стандартному методу и по системе *Muck Control* нужно проводить, используя показатели средних

значений V за кольцо. Исходные данные, которыми пользовались для расчетов и анализа, были сохранены бортовым компьютером шита. Результаты расчетов были объединены в группы по типу вынимаемого грунта на разных интервалах проходки колец. Для каждого метода были найдены средние значения объема. Система *Muck Control* фиксировала в компьютере максимальное текущее значение объема, по интервалам в 10 секунд вынутаго за цикл проходки, а средние значения потоков и время проходки были сохранены компьютерной системой ТПМК в файлах средних значений данных. Затем были рассчитаны дисперсия, среднеквадратическое отклонение и размах вариации, представленные в таблице, а также построены линейные графики сглаживания с величиной достоверности линейной аппроксимации R^2 (рис. 3).

Источниками погрешностей методов определения объема являются:

- ошибки измерений датчиками потоков (фактор приборной точности),
- неточность временного интервала цикла проходки в пределах 10 сек (фактор частоты измерений),
- опережение измерения входящего потока и запаздывание измерения выходящего потока (фактор размещения и согласования расходомеров) на 200-300 сек,

Грунт, тип, интервал колец	Усредненные показатели изменений усредненного объема разных типов грунтов по кольцам				Усредненные показатели измерений в цикле проходки					Усредненные показатели изменений объема разных типов грунтов по кольцам (Muck Control)			
	средний объем (по ср.), м ³	дисперсия (по ср.)	среднее квадратическое отклонение (по ср.), м ³	размах вариации % (по ср.)	усредненный транспортный поток, м ³ /ч	усредненный поток грунта, м ³ /ч	среднее время проходки, час	погрешность расхождений, %	ошибка определения объема грунта, %	средний объем (контроль), м ³	дисперсия (контроль)	среднее квадратическое отклонение (контроль), м ³	размах вариации % (контроль)
Песок мало-влажный (25-190к)	194	178	13,34	6,83	2485	130	1,52	0,20	4,25	206	300	17,32	8,43
Песок водонасыщенный (190-315 к)	254	479	21,89	8,58	2579	158	1,63	0,20	3,72	255	478	21,86	8,58
Песок+суглинок (315-450 к)	295	291	17,06	5,79	2632	209	1,44	0,20	2,92	291	214	14,63	5,03
Глина+супесь (450-675 к)	330	386	19,65	5,96	2692	177	2,05	0,20	3,61	338	181	13,45	3,99

- обнуление отрицательной разности выходящего и входящего потоков системой Muck Control, воспринимающей такую разность как ошибку (фактор алгоритма расчета).

Источниками погрешностей методов определения воздушной пористости являются:

- вышеперечисленные ошибки при определении объема грунта,

- погрешность измерения выработанного пространства датчиками линейного перемещения проходческих домкратов (незначительно),

- принятый постоянной величиной объем выработки за цикл для расчета по средним показателям за кольцо, поскольку в конце разных циклов проходки домкраты имеют разную величину выдвигания как сравнительно друг с другом, так и с собственным положением в конце разных циклов.

Перспективы использования и пути совершенствования методов:

1. Применение более точных приборов (особенно расходомеров) – пока приборы соответствуют уровню развития техники.

2. Увеличение частоты измерений – связано с дополнительными ресурсами компьютерной системы ТПМК для обработки данных, дает минимальный эффект, что при современном приборном обеспечении нецелесообразно.

3. Согласование показаний расходомеров входа и выхода потока возможно лишь приблизительно, поскольку подача питающего потока осуществляется все время с варьируемой скоростью из-за попеременной, хаотичной работы разных питающих каналов, служащих одновременно и для промывки ротора и дробилки.

4. В алгоритме расчета Muck Control необходимо допустить отрицательную разность выходящего и

входящего потока, возникающую из-за рассогласования измерений расходомеров, частичных закупорок трубопроводной системы и мест забора грунта, а также в аварийных случаях из-за утечки питающего раствора бентонита через забой или разрывы труб.

5. Для расчета воздушной пористости необходимо учитывать поправку на объем выработки в каждом цикле, пользуясь данными по максимальному выдвиганию домкратов в конце цикла проходки.

По результатам контроля объема грунта и воздушной пористости обоими методами в интервале от 25 до 535 кольца (на данной длине трассы в 1000 м проектом закладывается высота породного перекрытия постепенно от 10 до 28 м), после линейной аппроксимации и статистической обработки можно заключить следующее:

1. Размах вариации усредненного объема и пористости для разных типов грунтов в обоих методах выше приборной ошибки, что говорит о достоверности определения.

2. Объем выдаваемых песков не зависит от места выемки (от № кольца) внутри диапазона однотипных грунтов, определяемых по геологическому разрезу. Это говорит об однородном составе данного массива.

3. Объем содержащего глину выдаваемого грунта слабо возрастает с увеличением глубины залегания. Это говорит о некотором увеличении плотности массива, включающего в себя песок, супесь, суглинок и глину.

4. Средние значения объема выдачи, полученные обоими методами, практически не отличаются для всех типов грунтов, при этом для сплошной глины выдаваемый объем получается выше теоретического. Повышенные объемы глины, фактически не содержащей воздуха в порах, связаны с

ее набуханием в транспортном растворе бентонита.

5. Выдаваемый объем песка (с естественным водонасыщением около 0,6) на 25 % выше, чем песка малой влажности, что согласуется с геологическими данными по влажности и пористости песка на трассе тоннеля.

6. Наибольшее среднеквадратичное отклонение результатов измерения объема наблюдается для водонасыщенного песка, что говорит о переборе сечения забоя при проходке в неустойчивом грунте.

7. Более значительные отклонения объема для глинистых пород, определяемого по средним показателям за кольцо, по сравнению со сглаженными показателями **Muck Control**, где отрицательная разность потоков выхода и входа обнуляется, можно объяснить неустойчивостью потоков трубопроводного транспорта глины, связанной с ее налипанием [4].

4. Пример использования измерений пористости для прогноза осадки поверхности

Как показывает анализ результатов проведенных измерений, линия профиля мульды осадок зависит от воздушной пористости и связанной с ней водонасыщенностью вынимаемого грунта, характеризующих способность массива к деформированию. Воздушное разрыхление грунта может быть оценено по разности выходящего и входящего потоков трубопроводного транспорта породы, отнесенной к геометрическому объему выемки [2]. Связь осадки и процентного содержания воздушных пор может быть аппроксимирована линейной возрастающей зависимостью с высокой величиной достоверности (рис. 4). Отрицательные значения пористости при минимальных осадках характерны для набухающих глин, высокие значения осадок – для маловлажных пес-

ков, промежуточные возрастающие значения осадок – для песков с уменьшающейся степенью водонасыщения.

Выводы

1. Показано, что актуальная задача прогноза и поддержания безопасного состояния городской поверхности над тоннелем большого сечения может быть решена с помощью непрерывного контроля объема породы, вынимаемой во время проходки.

2. Для решения задачи контроля на входящем и на отходящем потоке ТПМК устанавливаются индукционные измерители объемного расхода, по разнице показаний которых можно оценить объем выдаваемого грунта за время подвижки щита при цикле проходки, как через 10-секундные интервалы, так и через усредненные показатели потоков за цикл.

3. Метод средних значений объема вынутого грунта за цикл проходки на расстоянии одного кольца не работает в режиме реального времени, так как предусматривает расчеты вручную и сравнительный анализ объемов только по завершении цикла проходки.

4. В 2006 году на ТПМК была впервые установлена новая система **Muck Control**, непрерывно контролирующая объемный выход породы в зависимости от положения проходческих домкратов. Данная система позволяет операторам проходки по текущим графикам следить за выходом грунта и при резких увеличениях объема выдачи останавливать проходку, чтобы принять соответствующие технологические меры.

5. Для оперативного контроля система **Muck Control** использует датчики линейного перемещения, встроенные в один из каждой группы проходческих домкратов. Измерения расстояния проводятся по времени

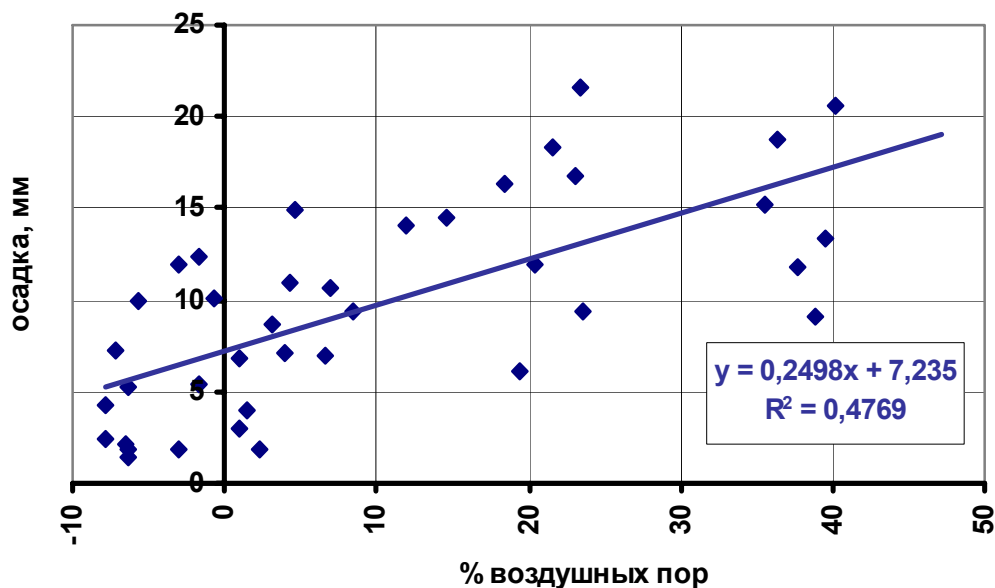


Рис. 4. Зависимость осадки от воздушной пористости грунта

прохождения ультразвукового сигнала по волноводу – от точки магнитоstrictionного возбуждения (на поршне) до точки приема (на торце гидроцилиндра).

6. Получены, статистически обработаны, обсуждены результаты и по-

грешности двух методов контроля среднего объема грунта (контроля средних значений и текущего контроля системой **Muck Control**) за каждый цикл проходки на протяжении 1020 м в интервале от 25 до 535 кольца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамсон В. М., Закиров А. З., Муравин Г. И.* Автодорожный тоннель на трассе Краснопресненского проспекта от МКАД до проспекта Маршала Жукова. // Метро и тоннели. – 2003. – №3. – С. 22-25.

2. Dipl.-Ing. Gerhard Wehrmeier. Massenkontrolle bei Schildvortrieben – Stand und Erfahrungen // Tunnelbau im Untertagebau / Taschenbuch für den Tunnelbau 2002.- 26. Jahrgang. -Verlag

Glueckauf GmbH, Essen. - 2001, S. 184-227.

3. *Арбузов М.Ю., Мазин С.В., Власов С.Н., Синицкий Г.М., Яцков Б.И.* Итоги первого этапа проходки тоннелей в Серебряном Бору // Метро и тоннели. - 2005. – №2. – С. 12-15.

4. *Мазин С.В., Соломатин Ю.Е.* Активный пригруз забоя. Большие миксциты «Херренкнехт» в Москве // Метроинвест. - 2004. - №4. – С. 18-22. **ГИАЗ**

Коротко об авторе

Мазин С.В. – кандидат технических наук, сервис-инженер ООО «Херренкнехт тоннельсервис».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник*.

