

УДК 622.272

**С.В. Мазенин****РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ДЛЯ ПРОГНОЗНЫХ ОСАДОК ДНЕВНОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ  
ГРУНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТПМК**

Семинар № 2

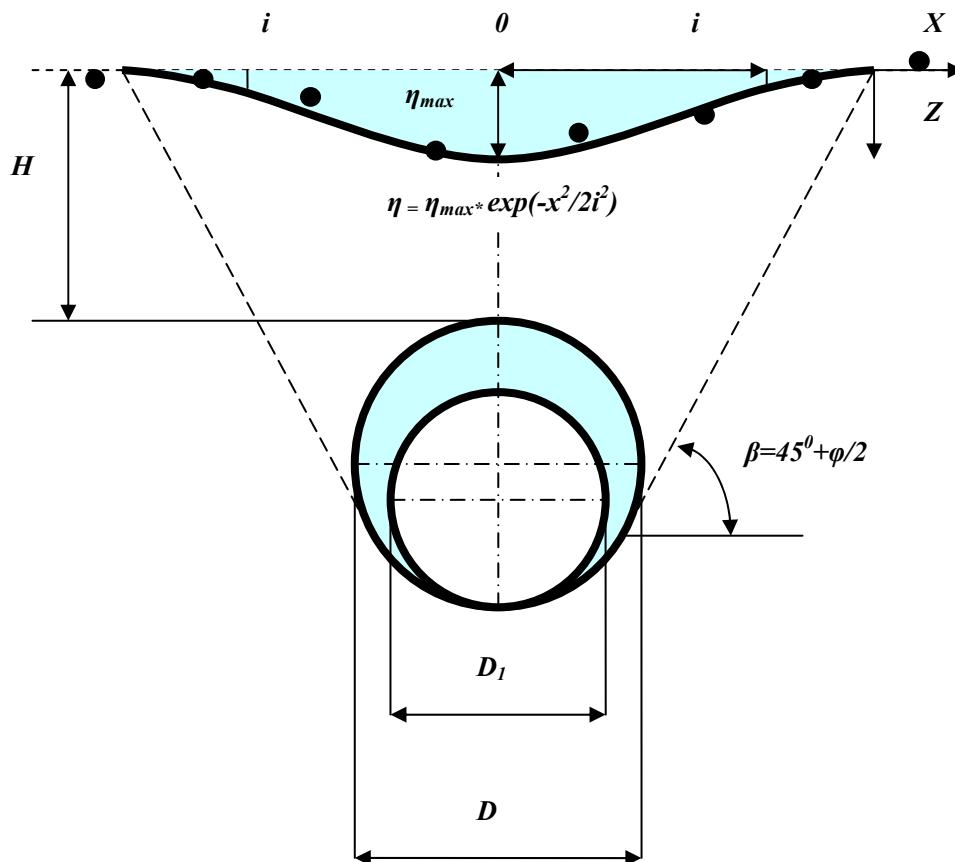
**С**овременное транспортное тоннелестроение осуществляется большими щитами, например, работающими в Москве на проходке Серебряноборских тоннелей. При проходке последовательно встречается широкий спектр неустойчивых грунтов: от несвязных (песок) до смешанных (суглинок) и связных (глина) типов. Тоннелепроходческий комплекс диаметром 14,2 м с регулируемым гидропригрузом забоя бентонитовой суспензией, с железобетонной кольцевой обделкой и тампонажным раствором разрабатывает грунт ротором. Осуществляется контроль текущих показателей: пространственного положения щита, рабочих давлений, объема выдачи грунта. Перед пуском ТПМК в работу обычно прогнозируют, в каком приблизительно диапазоне не можно ожидать осадки земной поверхности (оптимистический и пессимистический прогноз).

При меняющихся мощностях  $H$  породного перекрытия возникают дополнительные, ранее не изученные, не охватываемые прогнозом причины осадки поверхности. Поэтому важным аспектом является избирательный учет факторов влияния на осадку, произведенный после всестороннего анализа всех известных причинно-следственных связей факторов и их

корреляционные зависимости с показателями осадок поверхности в реальных условиях проходки тоннеля. Создавая математическую модель для прогнозных осадок дневной поверхности, при установлении влияющих факторов нужно учесть, чтобы они должны быть по возможности совместимыми и независимыми [1, 2].

В качестве показателя осадок поверхности принимаются отслеженные НИЦ ТМ ОАО «ЦНИИС» максимальные осадки в центре мульды (вычисленные после аппроксимации замеров на поперечных линиях реперов кривой Гаусса) над конкретным кольцом обделки второго транспортного тоннеля в Серебряном Бору [3], стабилизированные после удаления забоя от наблюдательных поперечных линий реперов (рис. 1).

В качестве факторов влияния (рис. 2) принимаются усредненные технологические показатели контроля цикла проходки ближайшего к наблюдательной линии кольца, а также геометрические параметры разрабатываемого массива и усредненные данные по свойствам вынимаемого грунта (при этом используется геологический разрез по тоннелю и усредненные результаты испытания соответствующих образцов породы).



**Рис. 1. Поперечная мурда осадок над тоннелем**

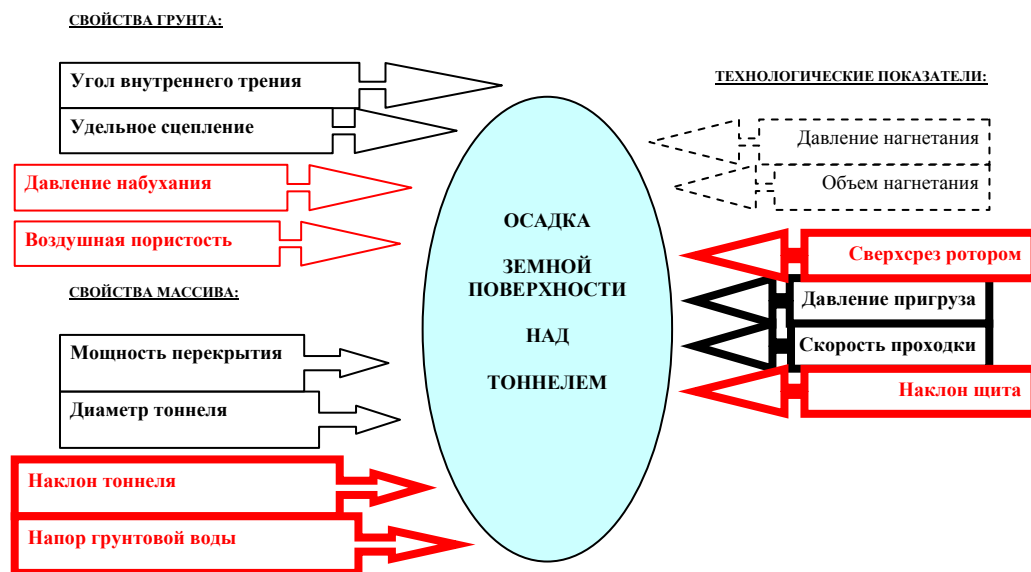
В целях оптимизации процессов эффективного, экономически и экологически целесообразного тоннельного строительства решаются задачи: анализа и выбора факторов влияния на осадку рабочих показателей щитового тоннелестроения, математической и статистической обработки данных показателей, прогноза осадок в процессе проходки по полученным статистическим и математическим моделям.

Создавать единую модель, описывающую все взаимосвязи, практически нецелесообразно, так как она будет слишком громоздкой и непригод-

ной для решения комплексных задач проектирования, планирования технологического процесса и управления проходкой. Общая модель связи факторов щитовой проходки и осадения земной поверхности в целях минимизации осадок будет состоять из частных моделей, связанных между собой единством цели и обязательным условием последовательного решения такой минимизации от общих задач к частным: проектирование, планирование и управление.

#### **Результаты исследований**

1. Авторская концепция исследования полученных при проходке 2



**Рис. 2. Влияние групп факторов на осадку поверхности**

Серебряноборского тоннеля данных по поведению проходческого щита и вмещающего грунтового массива состоит в нахождении факторных связей и построении возможных моделей осадки земной поверхности над тоннелем.

2. Определяющими параметрами массива пород в прогнозе осадок земной поверхности будут факторы вмещающего массива [4], связанные с явлениями взаимодействия грунта с водой (напор грунтовой воды; давление набухания пород почвы и кровли тоннеля на контакте с водным раствором бентонита), а также геометрический фактор уклона тоннеля по направлению проходки.

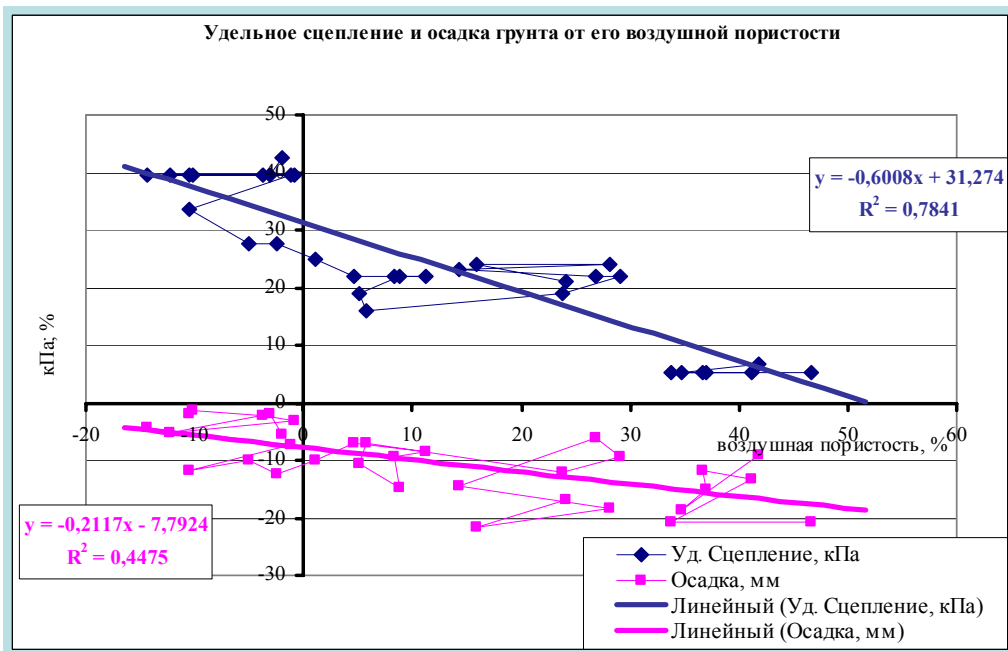
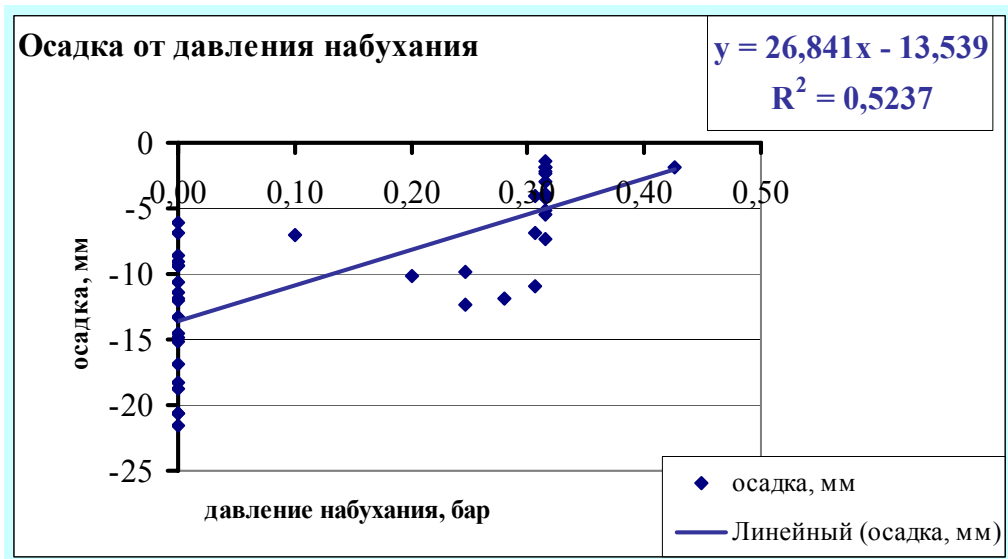
3. Важными показателями щитовой технологии для проявления осадок ранее определены складывающиеся геометрию технологического (между стенками выработки и щита) зазора, частичное заполнение которого грунтом вызывает осадку поверхности [4, 5], факторы: наклон щита относи-

тельно оси тоннеля; сверхсрез наклонном ротора. Автором увеличено число учитываемых факторов, что продиктовано необходимостью более полного анализа взаимодействия системы «щит-массив».

4. Расширен список показателей из подгруппы «свойства грунта», участвующих в прогнозе осадок, чтобы отсеять незначимые для осадки показатели, последовательно добавляя в создаваемые модели факторы грунтового массива и технологии с определенной автором их значимостью.

5. В качестве главных факторов для построения модели осадок от свойств грунта выбраны: удельное сцепление  $c$  (кПа) и угол внутреннего трения  $\varphi$  (градус) (который определяет углы сдвигаемого грунта  $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ ), воздушную пористость  $p$  (%), давление набухания пород почвы  $\Delta P$  (бар).

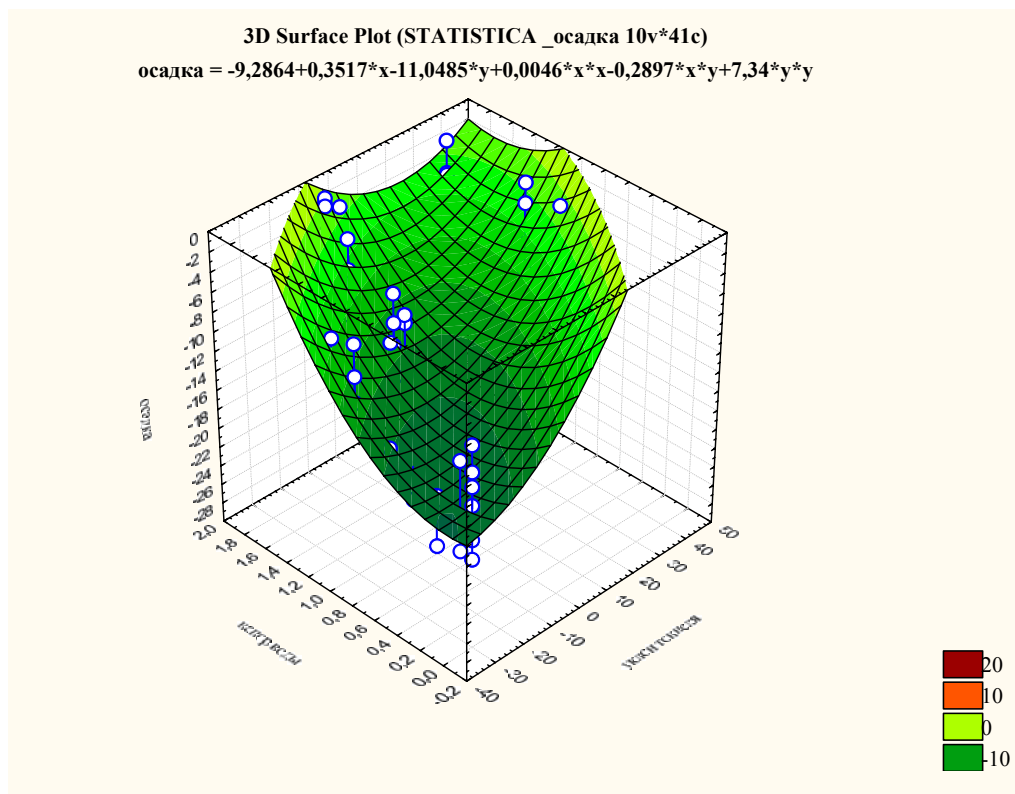
6. Правомочность введения в факторный анализ осадки таких не



**Рис. 3. Линейное влияние факторов «свойства грунта» на осадку поверхности**

рассматривающихся ранее показателей грунта, как воздушная пористость  $r$ , текущее значение которой вычисляется при проходке, и разность давлений набухания пород

почвы и кровли  $\Delta P$ , доказываемая полученными для тоннеля экспериментально, удовлетворительными корреляционными соотношениями при достоверности аппроксимации 0,99, а



**Рис. 4. Графическая модель процесса осадки от главных свойств массива для прогноза по данным трассы и геологии (уклона тоннеля  $X$  и напора грунтовой воды  $Y$  на оси тоннеля) – прогноз при проектировании**

$R^2(\eta_{max}(p)) = 0,4475$  и  $R^2(\eta_{max}(\Delta P)) = 0,5237$ , формулами (рис. 3):  
 $\eta_{max} = -0,212 \cdot p - 7,8$  и  $\eta_{max} = 26,8 \cdot \Delta P - 13,5$  мм.

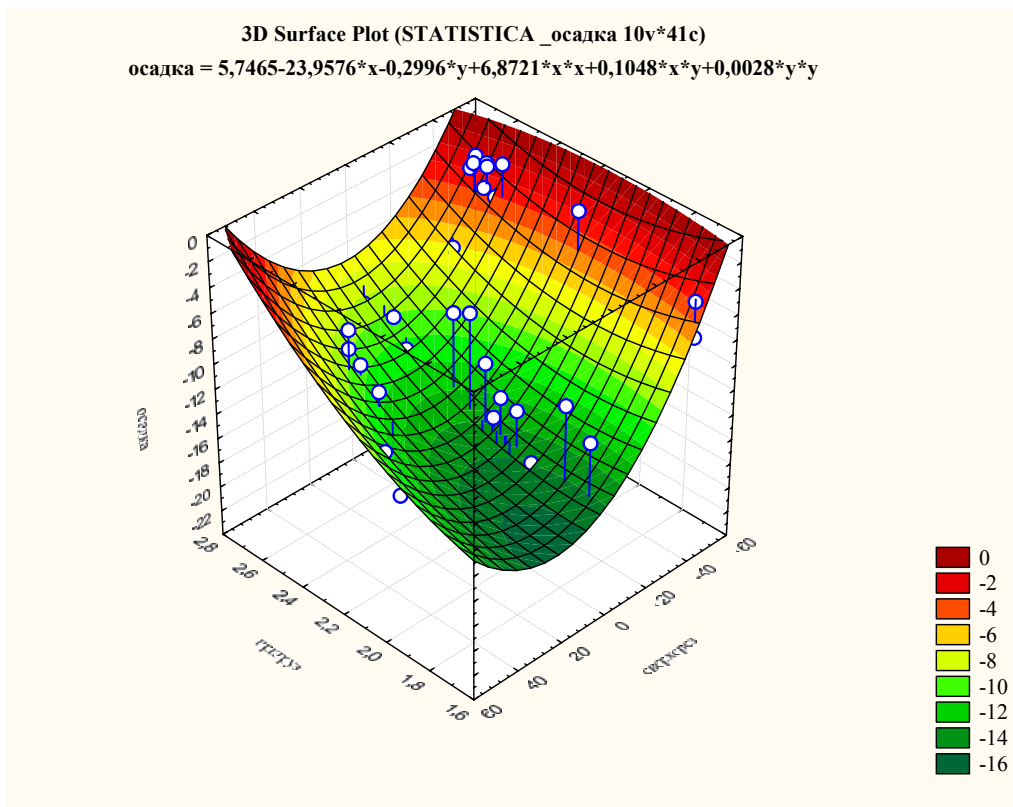
Кроме того, удельное сцепление грунта (синяя прямая), а значит и тип связности пород, влияющий на параметры геотехнологии и на геомеханику грунта, можно прогнозировать после каждого цикла проходки по относительной разнице объема выработки и объема транспортировки грунта по трубам, то есть по воздушной пористости.

8. В целях учета свойств массива в предварительном проектном прогнозировании возможных осадок по данным трассы и геологии автором исключена глубина заложения свода тоннеля  $H$ . Затем построена статисти-

стическая модель процесса осадки поверхности с учетом максимального биномиального влияния двух главных факторов свойств массива: напора грунтовой воды  $P_B$  (бар) и уклона тоннеля  $i_T$  (мм/м). Математическое описание статистической модели (рис. 4):  
 $\eta_{max} = 0,0046 \cdot i_T^2 + 0,352 \cdot i_T + 7,34 \cdot P_B^2 - 11,05 \cdot P_B - 0,29 \cdot i_T \cdot P_B - 9,2$  мм.

Самым большим осадкам (рис. 4) подвержен массив без большого напора грунтовой воды (менее 0,8 бар) и подсекаемый тоннелем под большим отрицательным уклоном (менее -1 %).

9. Математическое описание статистической модели «осадка-шит», построенной и рекомендуемой автором к использованию в технологическом



**Рис. 5. Графическая модель процесса осадки от главных технологических факторов свободного регулирования оператором: сверхсреза  $Y$  и пригруза  $X$  – прогноз при управлении**

прогнозе оператором шитового комплекса для проходческого цикла во время управления проходкой (Рис. 5):  

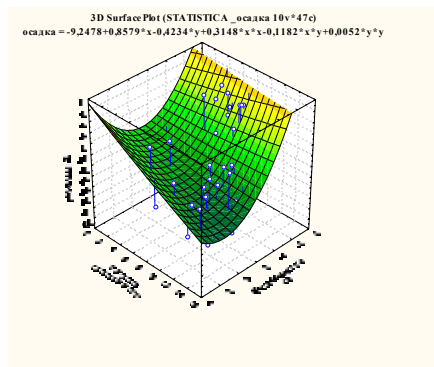
$$\eta_{max} = 6,87 P_3^2 - 23,9 P_3 + 0,0028 \Delta h^2 - 0,299 \Delta h + 0,105 \Delta h P_3 + 5,7 \text{ (мм)}$$
Модель построена с учетом максимального биномиального влияния двух главных факторов свободного регулирования шитовой технологии: *сверхсреза*  $\Delta h$  (мм) и *пригруза*  $P_3$  (бар), выбранных из-за наименьшего взаимовлияния и хорошей возможности их быстрого регулирования, с исключением факторов наклона шита  $i_{ш}$  (мм/м) и скорости проходки  $v$  (м/сут).

10. Автором рекомендован окончательный расчет прогнозных осадок

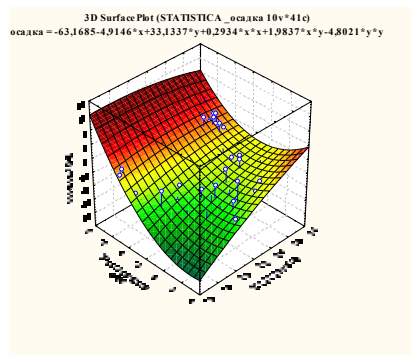
(1) в центре мульды, описываемой общепринятой кривой нормального распределения Гаусса:

$$\eta_{max} = v_L^* D^2 \cdot \pi / (4i \cdot \sqrt{2 \pi})$$
 (где абсцисса точки перегиба кривой мульды осадок:  $i = D / (6 \sin \beta) + (H + D) / \operatorname{tg} \beta$ ) [4] через показатель относительной потери грунта  $v_L^*$  (%), который биномиально, на основе найденных двухфакторных зависимостей (рис. 6), выражен через факторы шитовой технологии (2):  

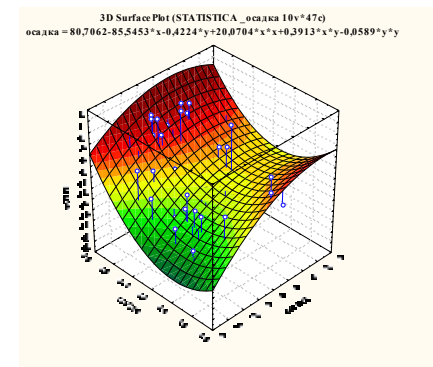
$$v_L^* = 0,204 \cdot P_3^2 + 0,00812 \cdot i_{ш}^2 - 0,000716 \cdot v^2 - 0,7 \cdot P_p - 0,054 \cdot i_{ш} - 0,0113 \cdot v + 0,0264 \cdot P_3 \cdot i_{ш} - 0,00157 \cdot v \cdot i_{ш} + 0,0052 \cdot P_3 \cdot v + 0,33$$



**А) скорость (Y) и наклон шита (X)**



**Б) наклон шита (X) и пригруз (Y)**



**В) пригруз (X) и скорость проходки (Y)**

**Рис. 6. Биномиальное влияние технологических факторов (скорость проходки, наклон шита и пригруз забоя) на осадку Z для определения относительной потери грунта  $v_L$  в формуле (2) – точный ежесуточный прогноз при управлении**

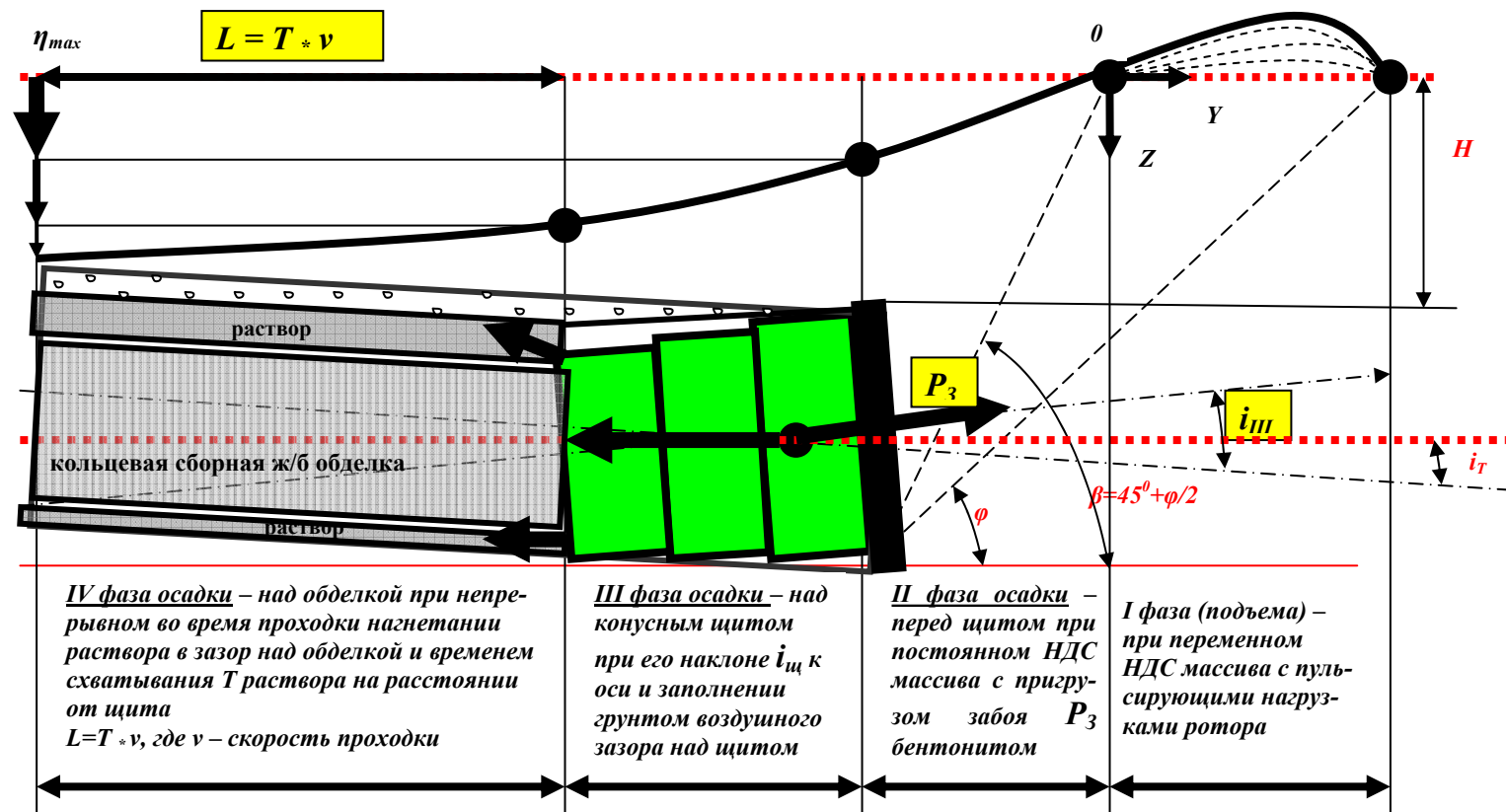


Рис. 7. Кривая фаз осадок вдоль тоннеля, зависящая от технологических факторов (скорость проходки, наклон щита и пригруз забоя)



**Результаты прогнозов величин осадки  
и отклонений от факта**

кольцо	Факт. осадка	1 осадка по статистической формуле от 3 факторов	1 отклонение от факта (погрешность)	2 осадка по математической формуле при средней $v_L$ как у факта	2 отклонение от факта (погрешность)	относительная потеря грунта $v_L$	3 осадка по окончательной математической формуле с учетом $v_L$ по статистике	3 отклонение от факта (погрешность)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
52	<b>-9,1</b>	-12,60	<b>-3,50</b>	-13,42	<b>-4,32</b>	0,50	-17,22	-8,12
70	<b>-18,7</b>	-15,33	<b>3,37</b>	-13,20	<b>5,50</b>	0,61	-20,62	-1,92
84	<b>-15,2</b>	-13,67	<b>1,53</b>	-12,80	<b>2,40</b>	0,54	-17,81	-2,61
95	<b>-11,8</b>	-11,59	<b>0,21</b>	-12,60	<b>-0,80</b>	0,46	-14,88	-3,08
109	<b>-13,3</b>	-14,03	<b>-0,73</b>	-12,29	<b>1,01</b>	0,56	-17,57	-4,27
124	<b>-20,7</b>	-13,67	<b>7,03</b>	-12,29	<b>8,41</b>	0,54	-17,11	3,59
139	<b>-20,6</b>	-12,78	<b>7,82</b>	-11,94	<b>8,66</b>	0,51	-15,54	5,06
151	<b>-11,4</b>	-13,77	<b>-2,37</b>	-11,94	<b>-0,54</b>	0,55	-16,74	-5,34
184	<b>-16,4</b>	-14,87	<b>1,53</b>	-11,46	<b>4,94</b>	0,59	-17,35	-0,95
201	<b>-16,8</b>	-14,87	<b>1,93</b>	-11,30	<b>5,50</b>	0,59	-17,11	-0,31
215	<b>-21,6</b>	-14,78	<b>6,82</b>	-11,30	<b>10,30</b>	0,59	-17,00	4,60
229	<b>-18,3</b>	-13,75	<b>4,55</b>	-11,30	<b>7,00</b>	0,55	-15,82	2,48
247	<b>-14,5</b>	-12,71	<b>1,79</b>	-11,34	<b>3,16</b>	0,50	-14,68	-0,18
283	<b>-6,1</b>	-11,43	<b>-5,33</b>	-10,88	<b>-4,78</b>	0,45	-12,67	-6,57
291	<b>-9,4</b>	-14,02	<b>-4,62</b>	-10,94	<b>-1,54</b>	0,56	-15,61	-6,21
305	<b>-12,0</b>	-14,47	<b>-2,47</b>	-10,65	<b>1,35</b>	0,57	-15,69	-3,69
338	<b>-6,9</b>	-10,83	<b>-3,93</b>	-10,26	<b>-3,36</b>	0,43	-11,31	-4,41
349	<b>-10,6</b>	-13,93	<b>-3,33</b>	-9,97	<b>0,63</b>	0,55	-14,14	-3,54
362	<b>-14,9</b>	-13,29	<b>1,61</b>	-10,00	<b>4,90</b>	0,53	-13,54	1,36
400	<b>-9,4</b>	-10,92	<b>-1,52</b>	-9,54	<b>-0,14</b>	0,43	-10,60	-1,20
424	<b>-8,6</b>	-10,40	<b>-1,80</b>	-9,32	<b>-0,72</b>	0,41	-9,87	-1,27
439	<b>-7,1</b>	-12,03	<b>-4,93</b>	-8,41	<b>-1,31</b>	0,48	-10,30	-3,20
455	<b>-10,1</b>	-8,82	<b>1,28</b>	-8,31	<b>1,79</b>	0,35	-7,47	2,63
467	<b>-12,4</b>	-9,88	<b>2,52</b>	-8,22	<b>4,18</b>	0,39	-8,28	4,12
485	<b>-9,9</b>	-8,70	<b>1,20</b>	-8,13	<b>1,77</b>	0,35	-7,20	2,70
499	<b>-11,9</b>	-7,29	<b>4,61</b>	-7,99	<b>3,91</b>	0,29	-5,93	5,97
513	<b>-7,3</b>	-5,45	<b>1,85</b>	-7,90	<b>-0,60</b>	0,22	-4,38	2,92
527	<b>-4,2</b>	-2,17	<b>2,03</b>	-7,90	<b>-3,70</b>	0,09	-1,74	2,46
546	<b>-3,9</b>	-6,00	<b>-2,10</b>	-7,73	<b>-3,83</b>	0,24	-4,72	-0,82
560	<b>-1,9</b>	-4,23	<b>-2,33</b>	-7,73	<b>-5,83</b>	0,17	-3,33	-1,43
585	<b>-1,4</b>	-3,83	<b>-2,43</b>	-7,57	<b>-6,17</b>	0,15	-2,96	-1,56
601	<b>-2,2</b>	-5,22	<b>-3,02</b>	-7,57	<b>-5,37</b>	0,21	-4,02	-1,82

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
618	<b>-3,0</b>	0,38	<b>3,38</b>	-7,57	<b>-4,57</b>	-0,02	0,29	3,29
631	<b>-5,2</b>	-3,08	<b>2,12</b>	-7,42	<b>-2,22</b>	0,12	-2,33	2,87
636	<b>-1,9</b>	-3,38	<b>-1,48</b>	-7,42	<b>-5,52</b>	0,13	-2,55	-0,65
641	<b>-5,4</b>	-4,94	<b>0,46</b>	-6,99	<b>-1,59</b>	0,20	-3,52	1,88
648	<b>-2,4</b>	-4,14	<b>-1,74</b>	-6,92	<b>-4,52</b>	0,16	-2,92	-0,52
694	<b>-1,9</b>	-3,17	<b>-1,27</b>	-7,42	<b>-5,52</b>	0,13	-2,40	-0,50
726	<b>-4,0</b>	-4,88	<b>-0,88</b>	-10,78	<b>-6,78</b>	0,19	-5,36	-1,36
731	<b>-6,8</b>	-4,05	<b>2,75</b>	-10,93	<b>-4,13</b>	0,16	-4,51	2,29
739	<b>-10,9</b>	-7,47	<b>3,43</b>	-10,93	<b>-0,03</b>	0,30	-8,31	2,59
среднее	<b>-9,76</b>	-9,42	<b>0,34</b>	-9,82	<b>-0,06</b>	<b>0,37</b>	-10,12	<b>-0,36</b>
СКО	4,72	4,05	<b>2,75</b>	1,78	<b>3,73</b>	0,16	5,41	<b>2,77</b>

(при точном ежесуточном инженерном прогнозе результатов проходки под ответственными наземными сооружениями).

Можно также пользоваться показателем относительной потери грунта, усредненным по следующей формуле (3):

$v_L = s / 1,43$ , где  $s$  - относительное (в %) превышение площади круга забоя  $S_3 = \pi R_3^2$  над площадью круга передней части щита  $S_{щ} = \pi R_{щ}^2$  (при грубом прогнозе на стадии проектирования проходки под наименее ответственными наземными сооружениями).

11. По гипотезе автора построены графическая схема щитовой технологии и продольная мульда осадок, фазы развития которых зависят от соответствующих технологических факторов (рис. 7).

12. Результаты прогнозов величин максимальных осадок по предлагаемым формулам статистической модели указаны в таблице и рис. 8: 1 розовая линия - исходная статистическая модель трех факторов; 2 голубая линия - по пункту 10 (1 и 3) для грубого прогноза на стадии проектирования без учета технологических факторов (отклонение от синей кривой замеров 3,7 мм); 3 красная линия - по

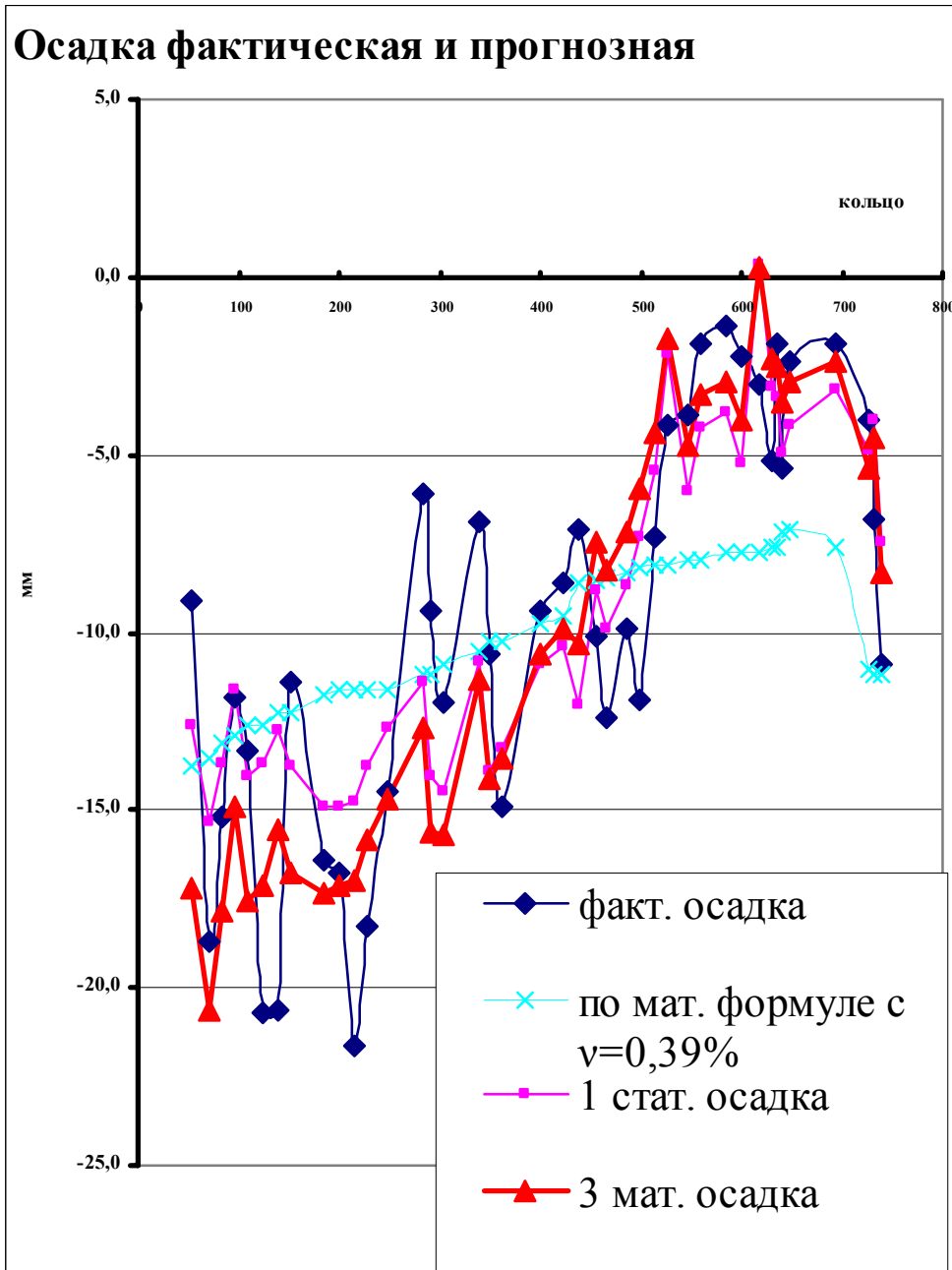
пункту 10 (1 и 2) для ежесуточного инженерного прогноза с учетом технологических факторов (отклонение от синего графика замеров 2,8 мм, то есть на 25 % точнее второго графика).

#### Выводы

1. Построена статистическая модель рекомендуемого прогнозирования возможных осадок поверхности по данным трассы и геологии с учетом максимального биномиального влияния двух главных факторов свойств массива: напора грунтовой воды  $P_B$  (бар) и уклона тоннеля  $i_T$  (мм/м).

2. Построена модель с учетом максимального биномиального влияния двух главных факторов свободного регулирования щитовой технологии: сверхсреза  $\Delta h$  (мм) и пригруза  $P_3$  (бар). рекомендуемая к использованию в технологическом прогнозе оператором щита для проходческого цикла во время управления проходкой.

3. Рекомендован точный расчет средних прогнозных осадок в центре мульды через показатель относительной потери грунта  $v_L^*$  (%), который в биномиальной модели выражен через 3 фактора щитовой технологии: пригруз



**Рис. 8. Распределение прогнозных осадок (по 3 формулам) и фактической осадки по трассе тоннеля**

забоя  $P_3$  (бар), наклон щита  $i_T$  (0/00) и скорость проходки  $v$  (м/сутки).

4. Без учета технологических факторов может проводиться только грубый пессимистический прогноз, для этого значение  $v_L^*$  принимается как относительное (в %) превышение площади круга забоя (ротора) над

площадью круга передней части щита, равное для большинства щитов 0,56%.

5. При полученном среднем значении  $v_L^* = 0,39$  % можно осуществить грубый прогноз средних значений осадки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маковский Л.В., Фам А.Т.* Проходка тоннелей в слабоустойчивых грунтах. Определение параметров мутьды осадок земной поверхности // Метро и тоннели. – 2006. – №5. – С. 24-25.

2. *Речицкий В.В.* Прогнозирование деформаций дневной поверхности при проходке тоннелей / Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М. -2005. - 24 с.

3. *Чеботаев В.В., Шекудов Е.В., Андрианов А.Г.* Прогнозирование деформаций грунтового массива при сооружении тоннелей щитами с активным пригрузом забоя (на примере Серебряноборских тоннелей) // Метро и тоннели. –2007. –№2. – С. 38-39.

4. *Мазеин С.В., Павленко А.М.* Зависимость осадок дневной поверхности от свойств породного массива и технологических параметров тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГГУ. -2007. - №6. – С. 171-176.

5. *Мазеин С.В., Павленко А.М.* Влияние текущих параметров щитовой проходки на осадку поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГГУ. - 2007. -№5. – С. 133-138.

6. *AFTES* Recommendations, Settlement induced by tunneling. – France. 1995. **IVAS**

#### Коротко об авторе

*Мазеин 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*.

