

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.016.25 (622.271.323.013(045))

**АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА****Часть 2. Исследование процесса проходки на основе математической
модели и экспериментальных данных**

Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Цыбуленко П.В., Шульдова С.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь), Желтов И.Г., Елизаров Д.П., Глинистый С.Л. (СУ-173 треста № 15 «Спецстрой», г. Минск, Беларусь)

Проведен статистический анализ данных о проходках нескольких участков коллектора «Центр» в г. Минске тоннелепроходческим комплексом компании «Herrenknecht». Сопоставлены результаты исследований по математической модели с экспериментальными данными и определен ряд параметров, необходимых для выполнения расчетов.

Введение

В первой части настоящего исследования [1] сформированы основные функциональные зависимости, характеризующие рабочий процесс тоннелепроходческого комплекса на базе тоннелепроходческой машины М-1166М. Программа исследований включала также визуальные наблюдения за работой комплекса и обработку данных, регистрируемых системой управления комплексом, частично отображаемых на пульте управления и заносимых в буфер бортового компьютера. Наличие такого большого объема информации позволило определить статистические характеристики ряда основных величин, отражающих работу комплекса в различных режимах, а также найти значения ряда параметров, необходимых для выполнения расчетов.

**Анализ основных параметров,
характеризующих процесс проходки тоннеля**

Исследования параметров, характеризующих работу основных звеньев комплекса, базировались на данных визуального наблюдения за параметрами работы, выводимыми на пульт управления, а также значений, заносимых в буфер управляющего процессора. На основании этих данных построены корреляционные матрицы, отображающие степень парных связей между исследуемыми параметрами. Ниже, в таблице 1, приводятся фрагменты исходных данных, использованных при формировании корреляционных матриц. Корреляционные матрицы построены для трех проходок между шахтами 9-10, 10-11, 11-12. Эти матрицы приведены в таблицах 2, 3, 4.

Относительно малые значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что величины, характеризующие процесс проходки, мало связаны между собой. Вместе с тем, величина коэффициента корреляции между усилием на домкратной станции и длиной тоннеля (рисунок 1) указывают на зависимость усилия от длины тоннеля [1].

В соответствии с этим проведена статистическая обработка значений величины силы давления цилиндров главной домкратной станции и получены регрессионные зависимости этой силы от длины тоннеля (рисунок 1).

Таблица 1 – Данные о процессе проходки из шахты № 9 в шахту № 10

Длина тоннеля, м	Дата	Время	Давление (раб. орган), бар	Обороты раб. органа, об/мин	Давление (главные домкраты), тонн	Суммарное давление (цилиндры управления), бар	Расход (питающая линия), м ³ /ч	Давление (питающая линия), бар	Расход (трансп. линия), м ³ /ч	Давление (трансп. линия), бар
0	08.10.2010	1:09:12	125	2,9	180	410	247	0,92	276	0,7
0,2	08.10.2010	1:12:20	119	2,4	174	346	252	0,87	434	0,66
0,4	08.10.2010	1:17:27	143	2,5	144	356	242	0,91	284	0,77
0,6	08.10.2010	1:23:58	132	2,5	144	371	240	0,86	361	0,63
0,8	08.10.2010	2:31:22	112	2,4	174	364	248	0,95	311	0,68
1	08.10.2010	2:34:28	121	2,3	180	334	221	0,87	283	0,6
1,2	08.10.2010	2:39:40	123	2,5	150	337	220	0,83	250	0,6
1,4	08.10.2010	2:47:04	111	2,5	162	345	221	0,84	277	0,61
1,6	08.10.2010	2:51:14	127	2,4	180	360	264	0,87	261	0,59
1,8	08.10.2010	5:10:00	71	2,5	186	385	230	0,75	268	0,67
2	08.10.2010	5:14:06	126	2,2	186	351	222	0,82	303	0,6
2,2	08.10.2010	5:24:04	129	2,2	156	387	224	0,78	259	0,58
2,4	08.10.2010	5:35:08	117	2,4	174	385	229	0,88	331	0,72
2,8	08.10.2010	22:46:58	151	2,7	198	545	260	0,93	298	0,77
3	08.10.2010	23:01:44	142	2,8	210	516	288	1,29	362	1,08
3,2	08.10.2010	23:09:01	137	2,5	180	422	226	0,86	301	0,61
3,4	08.10.2010	23:20:08	130	2,6	180	445	225	0,91	304	0,67
3,6	08.10.2010	23:34:18	129	2,7	204	544	220	0,91	244	0,72
3,8	08.10.2010	23:57:16	129	2,5	210	757	221	0,8	302	0,69
4	09.10.2010	0:06:58	137	2,8	216	507	250	0,88	310	0,8
4,2	09.10.2010	0:14:13	131	2,7	216	482	246	0,93	273	0,88
4,4	09.10.2010	0:22:29	143	2,7	228	492	253	0,85	279	0,77
4,6	09.10.2010	0:32:56	143	2,6	234	546	231	0,88	320	0,79
4,8	09.10.2010	0:45:25	122	2,6	216	484	224	0,83	273	0,77
5	09.10.2010	1:07:55	210	2,7	246	548	252	0,85	310	0,85
5,2	09.10.2010	1:17:18	131	2,5	228	432	223	0,84	316	0,74
5,4	09.10.2010	1:26:55	115	2,6	246	536	223	0,92	253	0,82
5,6	09.10.2010	1:37:36	135	2,6	252	553	247	0,86	302	0,85
5,8	09.10.2010	4:45:42	133	2,7	294	596	231	1,05	317	0,78
6	09.10.2010	4:55:38	159	2,9	246	473	259	0,94	327	0,77
6,2	09.10.2010	5:03:10	145	2,9	246	443	254	0,71	342	0,49
6,4	09.10.2010	5:10:27	130	2,8	270	508	257	0,82	308	0,62
6,6	09.10.2010	5:14:05	118	2,8	252	471	239	0,76	315	0,48
6,8	09.10.2010	5:17:34	113	2,8	240	457	244	0,78	317	0,48
7	09.10.2010	5:22:12	141	2,8	234	426	258	0,8	305	0,45
7,2	09.10.2010	5:38:16	135	2,8	258	457	273	1,05	345	0,75
7,4	09.10.2010	5:45:33	142	2,8	258	473	293	1,12	333	0,75

Таблица 2 – Корреляционная матрица величин, характеризующих проходку № 1 между шахтами 9-10

	Длина тоннеля, м	Давление (раб. орган), бар	Обороты раб. органа, об/мин	Давление (главные домкраты), тонн	Суммарное давление (цилиндры управления), бар	Расход (трансп. линия), м ³ /ч	Давление (трансп. линия), бар
Длина тоннеля, м	1	0,16308938	0,214688216	0,140032894	-0,381332868	0,552882555	-0,088125699
Давление (раб. орган), бар	0,163089383	1	0,1611476	-0,04683668	0,181413844	0,247577745	0,175479664
Обороты рабочего органа, об/мин	0,214688216	0,1611476	1	0,164515991	0,164023924	0,087553872	0,215635483
Давление (главные домкраты), тонн	0,140032894	-0,04683668	0,164515991	1	0,243191869	0,012680781	0,426693757
Суммарное давление (цилиндры управления), бар	-0,381332868	0,18141384	0,164023924	0,243191869	1	-0,373183638	0,446697166
Расход (трансп. линия), м ³ /ч	0,552882555	0,24757775	0,087553872	0,012680781	-0,373183638	1	-0,085241652
Давление (трансп. линия), бар	-0,088125699	0,17547966	0,215635483	0,426693757	0,446697166	-0,085241652	1

Таблица 3 – Корреляционная матрица величин, характеризующих проходку № 2 между шахтами 10-11

	Длина тоннеля, м	Давление (раб. орган), об/мин	Обороты раб. органа, об/мин	Давление (главные домкраты), тонн	Суммарное давление (цилиндры управления), бар	Расход (трансп. линия), м ³ /ч	Давление (трансп. линия), бар
Длина тоннеля, м	1	-0,120806663	-0,07543544	0,927026852	0,355943936	-0,235119833	0,28958377
Давление (раб. орган), бар	-0,120806663	1	-0,166742805	-0,076515147	0,121401083	0,08482332	-0,120125725
Обороты раб. органа, об/мин	-0,07543544	-0,166742805	1	-0,193870387	-0,261604692	0,07814747	-0,03083244
Давление (главные домкраты), тонн	0,927026852	-0,076515147	-0,193870387	1	0,447652683	-0,166264544	0,345491991
Суммарное давление (цилиндры управления), бар	0,355943936	0,121401083	-0,261604692	0,447652683	1	0,004940344	0,446947653
Расход (трансп. линия), м ³ /ч	-0,235119833	0,08482332	0,07814747	-0,166264544	0,004940344	1	0,044781427
Давление (трансп. линия), бар	0,28958377	-0,120125725	-0,03083244	0,345491991	0,446947653	0,044781427	1

Таблица 4 – Корреляционная матрица величин, характеризующих проходку № 3 между шахтами 11-12

	Длина тоннеля	Давление (раб. орган), бар	Обороты раб. органа, об/мин	Давление (главные домкраты), тонн	Суммарное давление (цилиндры управления), бар	Расход (трансп. линия), м ³ /ч	Давление (трансп. линия), бар
Длина тоннеля, м	1	0,047934885	-0,00496919	0,800870074	0,150800608	0,332515505	0,110257879
Давление (раб. орган), бар	0,047934885	1	0,127601738	0,094012754	0,212298233	-0,016116191	-0,029382613
Обороты раб. органа, об/мин	-0,00496919	0,127601738	1	0,013881671	-0,030440738	0,122050661	0,161583678
Давление (главные домкраты), тонн	0,800870074	0,094012754	0,013881671	1	0,19439605	0,230823211	0,212903535
Суммарное давление (цилиндры управления), бар	0,150800608	0,212298233	-0,030440738	0,19439605	1	0,050810549	0,412549457
Расход (трансп. линия), м ³ /ч	0,332515505	-0,016116191	0,122050661	0,230823211	0,050810549	1	0,132013855
Давление (трансп. линия), бар	0,110257879	-0,029382613	0,161583678	0,212903535	0,412549457	0,132013855	1

Эти зависимости позволяют найти осредненные значения ряда величин (K_n , l_p , $f_{пр}$), входящих в расчетную формулу для определения усилия продавливания [1]. При этом следует учесть то, что речь идет о среднем значении усилия продавливания, тогда как формула (17), приведенная в [1] позволяет определять не только средние, но и экстремальные значения этого усилия. Анализ значений максимальных усилий продавливания показал, что они превышают средние значения на 20-30 %. Это имеет место при установке каждого кольца и объясняется повышением коэффициента трения при остановке тоннеля и необходимости преодоления инерционного сопротивления.

Данные, приведенные на рисунке 1, показывают, что зависимость среднего значения усилия продавливания от длины пройденного участка тоннеля достаточно хорошо аппроксимируется линейной функцией. В частности, для коллектора «Центр» в г. Минске это усилие можно прогнозировать формулой:

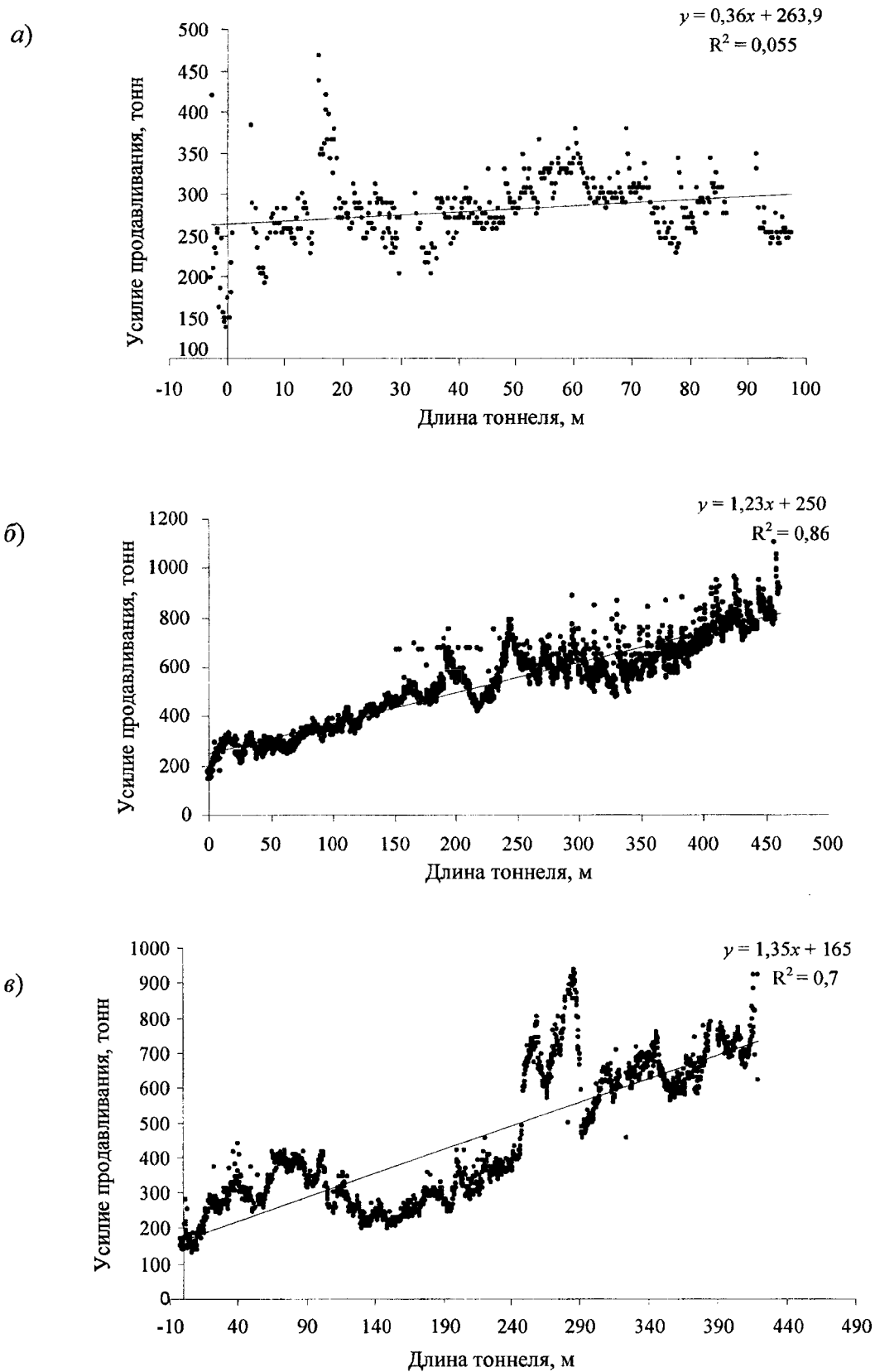
$$P_{прд} = 230 + 1,35 \cdot L,$$

где $P_{прд}$ – усилие продавливания, т;

L – длина пройденного участка тоннеля, м.

Ряд величин, характеризующих работу тоннелепроходческого комплекса, как показал корреляционный анализ, не связан между собой.

Поэтому, вместе с регрессионным анализом, некоторые результаты которого приведены выше, выборки ряда величин были подвергнуты дисперсионному анализу с целью установления законов их распределения и определения основных характеристик этих распределений. В первую очередь было проанализировано давление в системе привода рабочего органа, определяющее нагрузки на режущей головке. Результаты этого анализа представлены на рисунках 2-4.



$y = P_{\text{прд}}$ – усилие продавливания, тонны; $x = L$ – длина туннеля, м; R^2 – коэффициент детерминации;
а – проходка № 1, б – проходка № 2, в – проходка № 3

Рисунок 1 – Зависимость усилия основной домкратной станции от длины тоннеля

Средние значения давлений в гидроприводе рабочего органа составили при первой проходке – 116 бар, при второй – 121 бар, при третьей – 123 бар. Эти данные, как и величины среднеквадратических отклонений, свидетельствуют о том, что свойства грунтов с точки зрения затрат энергии на разрушение породы различаются незначительно. Распределения давлений в гидросистеме привода рабочих органов в трех рассмотренных примерах подчиняются нормальному закону распределения с параметрами, приведенными на рисунках. Такой же анализ был проведен для величины суммарного давления в цилиндрах управления поворотом режущей головки. Результаты этого анализа приведены на рисунке 3.

Данные, приведенные на рисунке 3, показывают, что суммарное давление на цилиндрах управления, которое пропорционально усилию подачи, также практически не изменяется на различных участках коллектора. Распределение суммарного давления, а следовательно, и усилия подачи, также выражается нормальным законом распределения. Средние значения этих давлений коррелируют между собой, что подтверждает справедливость применяемых обычно в расчетах постоянных значений коэффициентов пропорциональности между усилием резания и силой подачи.

Наряду с изучением нагрузочных режимов основной домкратной станции и привода режущей головки, были проанализированы основные кинематические и временные характеристики проходки тоннеля. Для этого разработаны специальные алгоритмы составления необходимых выборок данных из буфера обмена управляющего процессора и их обработки. Основные результаты, полученные при этом, сформированы в виде таблиц и рисунков, приведенных ниже.

Таблица 5 – Временные характеристики проходок из шахты № 9 в шахту № 10, из шахты № 11 в шахту № 10, из шахты № 11 в шахту № 12

№ проходки	Время остановок, часов	Время продвижения тоннеля, часов	Общее время, часов
1: (9-10)	224,2	30,4	254,6
2: (11-10)	626,6	163,8	790,4
3: (11-12)	590	189	779

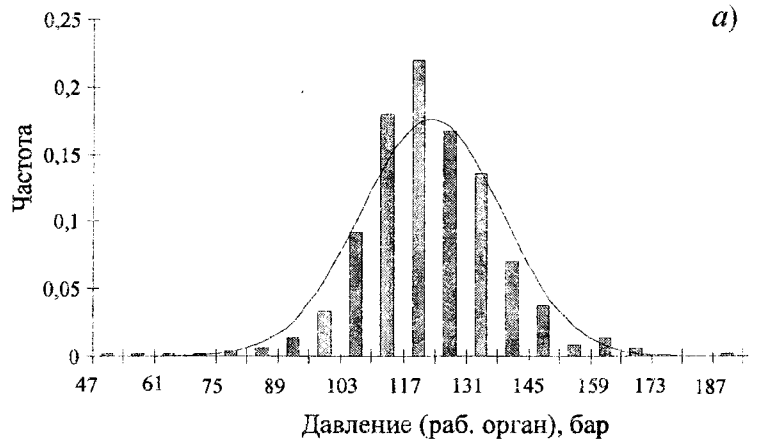
Анализ данных таблицы 5 показывает, что рабочий процесс устройства тоннелей с применением рассматриваемого комплекса сопряжен с большими затратами времени на остановки для установки железобетонных колец через каждые три метра продвижения тоннеля. Причем коэффициент использования чисто рабочего времени растет с увеличением длины отрезка тоннеля между двумя смежными шахтами. На рассматриваемых отрезках он составил: для первой проходки – 0,12; для второй – 0,215; для третьей 0,24, тогда как длина отрезка тоннеля в первом случае – 97,3 м; во втором – 474 м; в третьем – 420 м. Это послужило основой для более детального изучения данных об остановках при движении тоннелепроходческого комплекса. С этой целью был проведен статистический анализ общего времени остановок, результаты которого представлены на рисунке 4.

Среднее значение времени остановок также как и общее время проходки имеет тенденцию снижения по мере увеличения расстояния между шахтами и составило: при проходке № 1 – 4,53 часа; при проходке № 2 – 3,73 часа; при проходке № 3 – 3,2 часа.

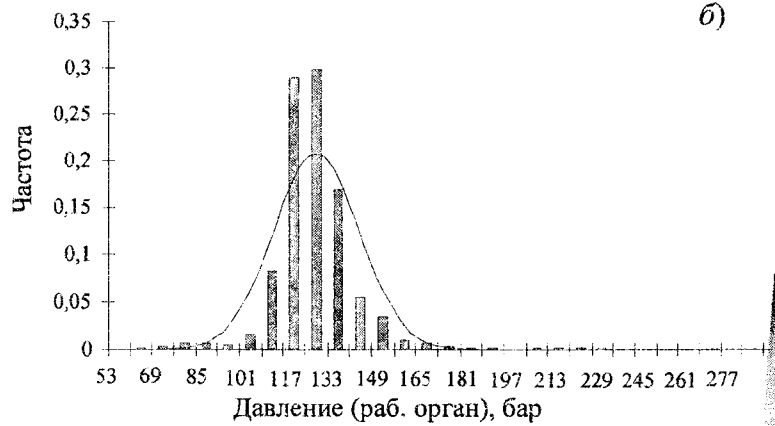
Из общего числа остановок отобраны и отдельно проанализированы временные интервалы в период установки железобетонных колец. Результаты этого анализа представлены на рисунке 5.

Среднее время остановок во всех трех случаях составило примерно 3,6 часа.

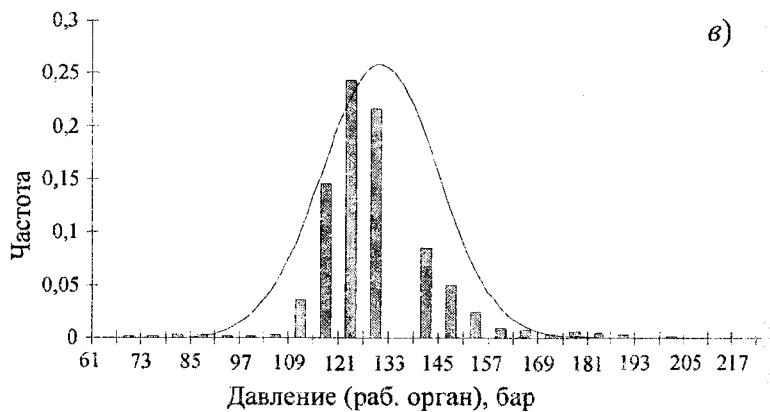
Среднее	115,965
Медиана	116
Мода	111
Стандартное отклонение	16,43431
Дисперсия выборки	270,0865
Эксцесс	3,590104
Асимметричность	-0,503674
Минимум	40
Максимум	182
Сумма	52996



Среднее	121,0009
Медиана	120
Мода	117
Стандартное отклонение	15,24621
Дисперсия выборки	232,4468
Эксцесс	14,80122
Асимметричность	1,641094
Интервал	228
Минимум	53
Максимум	281
Сумма	275277



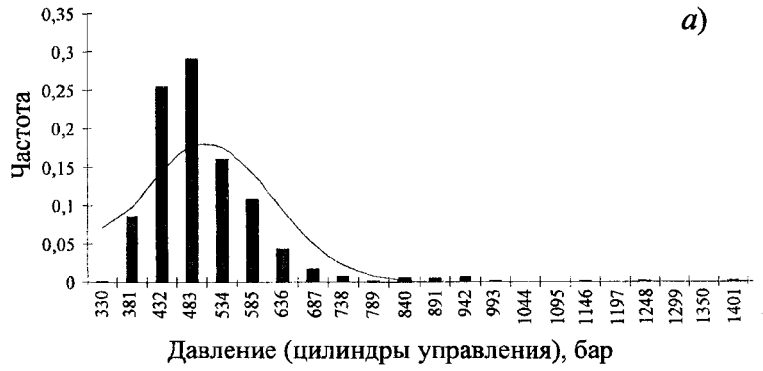
Среднее	124,893
Медиана	123
Мода	118
Стандартное отклонение	13,81858
Дисперсия выборки	190,9532
Эксцесс	5,859681
Асимметричность	1,021914
Интервал	154
Минимум	61
Максимум	215
Сумма	250910



а – проходка № 1; б – проходка № 2; в – проходка № 3

Рисунок 2 – К анализу давления в системе привода рабочего органа

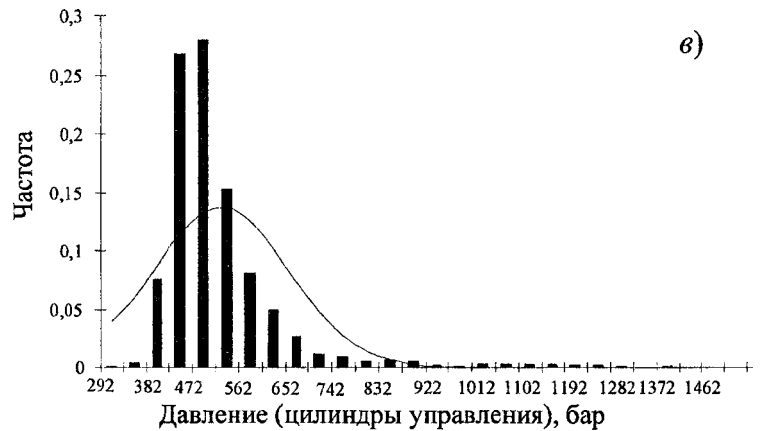
Среднее	480,6264
Медиана	459
Мода	445
Стандартное отклонение	112,2062
Дисперсия выборки	12590,24
Эксцесс	16,85472
Асимметричность	3,183782
Минимум	330
Максимум	1395
Сумма	218685



Среднее	435,0053
Медиана	418
Мода	371
Стандартное отклонение	81,28635
Дисперсия выборки	6607,471
Эксцесс	3,477911
Асимметричность	1,462411
Минимум	257
Максимум	957
Сумма	989637



Среднее	483,213
Медиана	449
Мода	470
Стандартное отклонение	130,4412
Дисперсия выборки	17014,91
Эксцесс	14,57357
Асимметричность	3,318359
Минимум	292
Максимум	1469
Сумма	970775

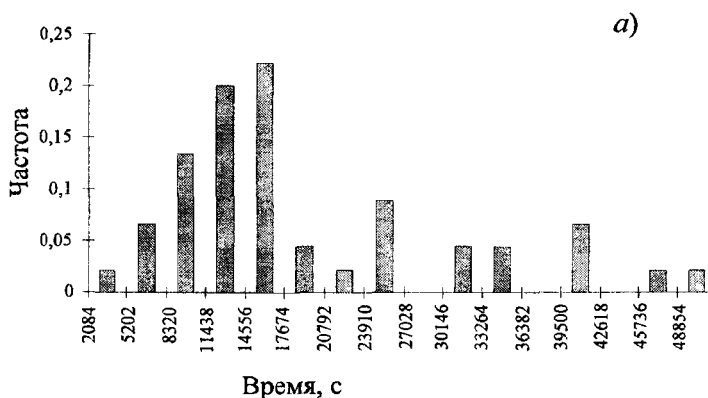


а – проходка № 1; б – проходка № 2; в – проходка № 3

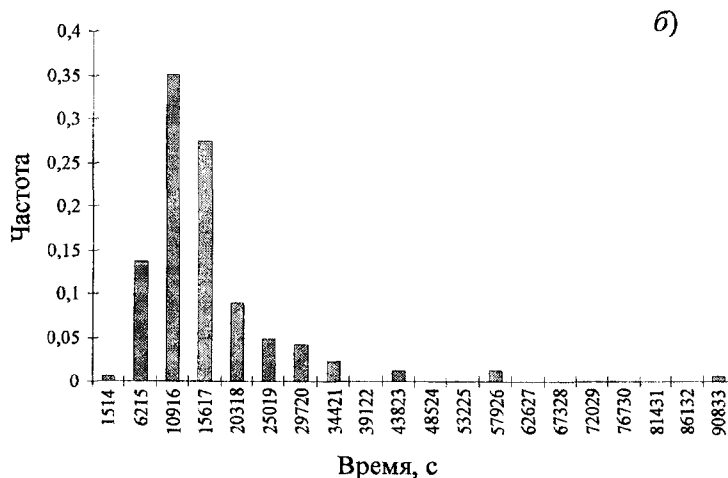
Рисунок 3 – Распределение давления в цилиндрах управления

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ № 1, 2012

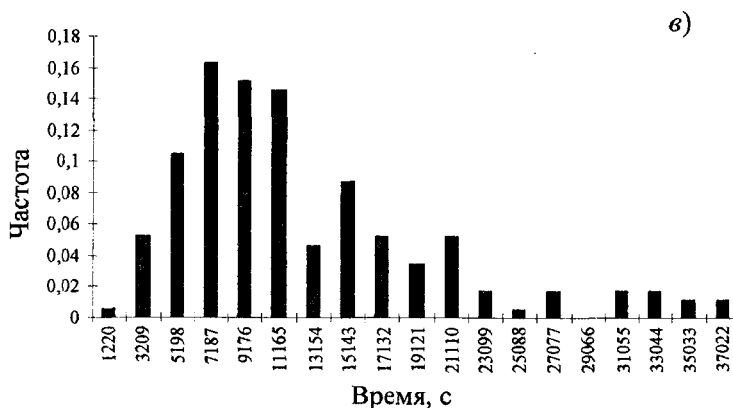
Среднее	16295,8667
Медиана	11873
Стандартное отклонение	11351,237
Дисперсия выборки	128850580
Эксцесс	0,45616835
Асимметричность	1,13372761
Минимум	2084
Максимум	45738
Сумма	733314
Счет	45



Среднее	13403,524
Медиана	10951,5
Мода	5671
Стандартное отклонение	10292,805
Дисперсия выборки	105941829
Эксцесс	17,723463
Асимметричность	3,4384164
Минимум	1514
Максимум	86139
Сумма	2251792

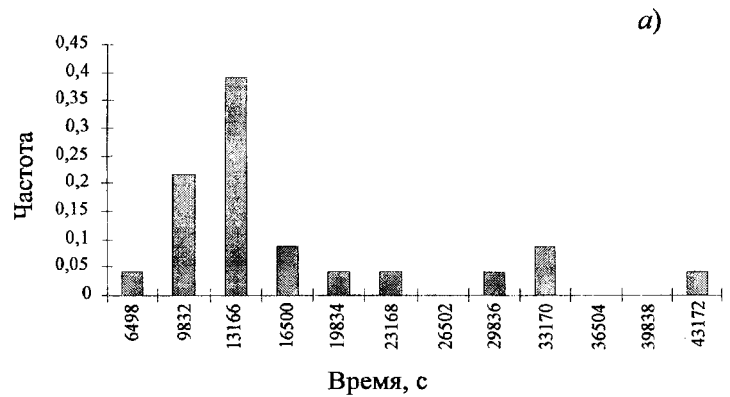


Среднее	11502,702
Медиана	9356
Стандартное отклонение	7586,1294
Дисперсия выборки	57549360
Эксцесс	1,5438366
Асимметричность	1,3406046
Минимум	1220
Максимум	37014
Сумма	1966962
Счет	171

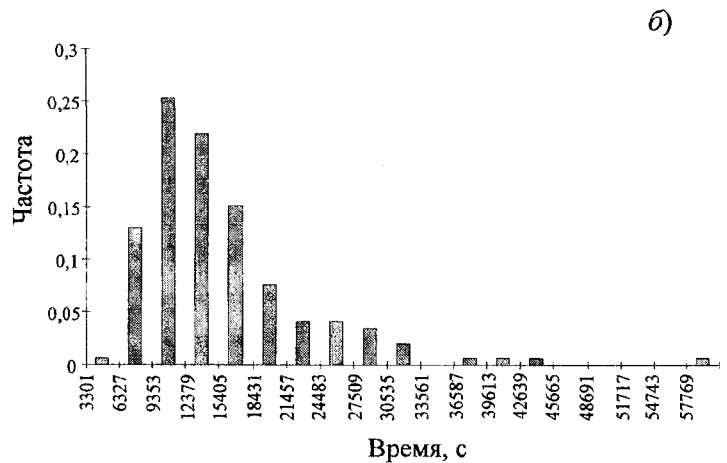


а – проходка № 1, б – проходка № 2; в – проходка № 3
Рисунок 4 – Результаты анализа остановок

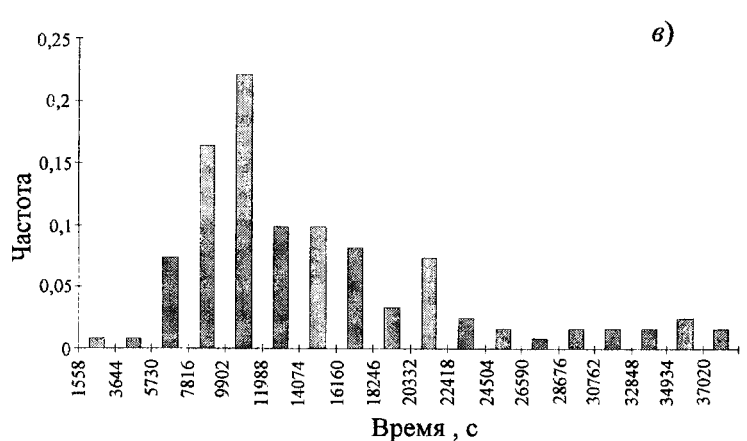
Среднее	15112,57
Медиана	11613
Стандартное отклонение	9533,942
Дисперсия выборки	90896046
Экссесс	2,256215
Асимметричность	1,654196
Минимум	6498
Максимум	43169
Сумма	347589



Среднее	12934,5548
Медиана	10969
Мода	5671
Стандартное отклонение	7881,6476
Дисперсия выборки	62120368,8
Экссесс	7,94593142
Асимметричность	2,27677392
Минимум	3301
Максимум	57770
Сумма	1888445



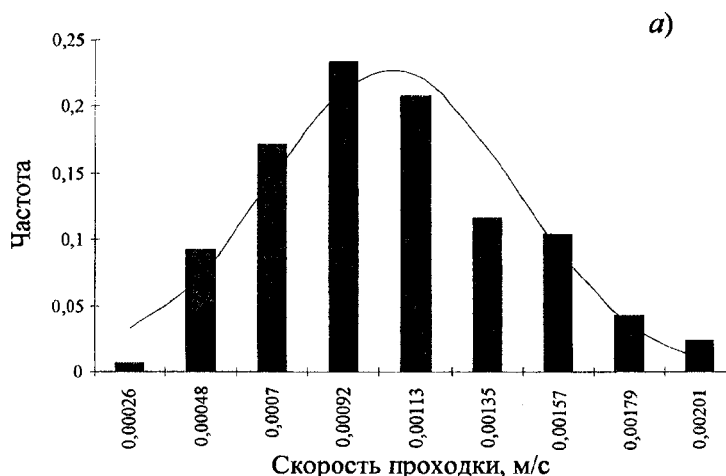
Среднее	12991,2
Медиана	9984,5
Стандартное отклонение	7663,267
Дисперсия выборки	58725657
Экссесс	1,363412
Асимметричность	1,347276
Минимум	1558
Максимум	37014
Сумма	1584927
Счет	122



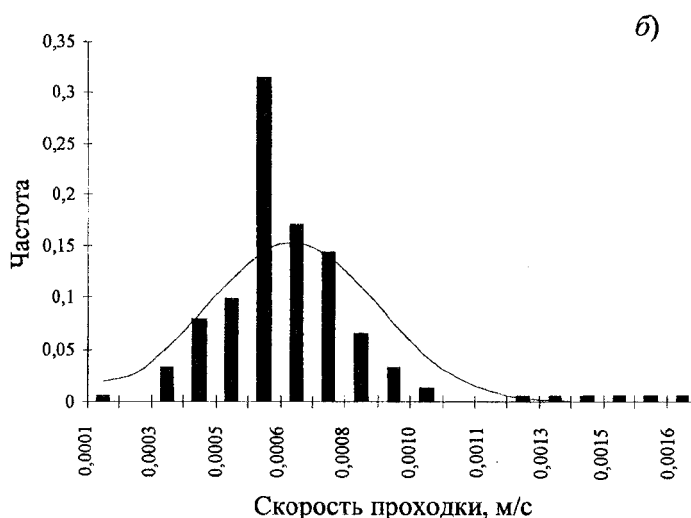
а – проходка № 1, б – проходка № 2; в – проходка № 3
**Рисунок 5 – Результаты анализа остановок
 через 3 метра проходки тоннеля**

Дисперсионному анализу подвергнута также скорость продвижения тоннеля при проходке двух его последних отрезков. Результаты представлены на рисунке 6.

Среднее	0,00095014
Медиана	0,00091408
Мода	0,00064461
Стандартное отклонение	0,0003756
Дисперсия выборки	1,4108E-07
Эксцесс	-0,16898175
Асимметричность	0,50619347
Минимум	0,00026221
Максимум	0,00198511
Сумма	0,15487207
Счет	163



Среднее	0,00059303
Медиана	0,00054769
Стандартное отклонение	0,00021665
Дисперсия выборки	4,6938E-08
Эксцесс	6,93424222
Асимметричность	2,05840167
Минимум	0,00014306
Максимум	0,00164609
Сумма	0,09014095
Счет	152



а – из шахты № 11 в шахту № 10; б – из шахты № 11 в шахту № 12
Рисунок 6 – Результаты анализа распределения скорости проходки

Среднее время остановок во всех трех случаях составило примерно 3,6 часа. В обоих случаях распределение скорости проходки подчиняется нормальному закону, хотя математические ожидания отличаются довольно значительно. Также существенно различаются и значения среднеквадратического отклонения. Это может быть объяснено различными причинами технического, горно-геологического и организационного характера, в том числе и человеческого фактора.

Заключение

Выполненные исследования, включающие разработку математических моделей основных стадий процесса строительства коллектора «Центр» с использованием комплекса на базе тоннелепроходческой машины «Herrenknecht», а также статистическую обработку большого объема фактического материала, полученного при проходке трех

участков коллектора, позволяют спрогнозировать основные технические показатели работы комплекса: скорости проходки, затраты времени, усилия на домкратной станции, нагрузки на режущей головке и т.п.

Анализ результатов исследований позволяет наметить мероприятия по повышению производительности комплекса путем рационального выбора режимов его работы.

Список использованных источников

1. **Казаченко, Г.В.** Анализ рабочего процесса тоннелепроходческого комплекса. Часть 1. Структура комплекса и формирование расчетных зависимостей / Г.В. Казаченко, П.В. Цыбуленко, И.Г. Желтов, Д.П. Елизаров // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 35-43.

Kazachenko G.V., Basalay G.A., Tsybulenko P.V., Shuldova S.G., Zheltov I.G., Elizarov D.P., Glinisty S.L.

Tunneling complex work process analysis. Part 2. Study of road-heading process on the base of mathematical model and test data.

Carried out statistical data analysis on road-headings of some collecting header sections called «Center» in Minsk using tunneling complex of the company «Herrenknecht». Compared the results of the investigation on the base of mathematical model with the test data; as well as some performances required for calculations were set.

Поступила в редакцию 02.02.2012 г.