ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(7):13-29

УДК 624.191.6 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-29

МОНИТОРИНГ БЕНТОНИТОВОГО ПРИГРУЗА ДЛЯ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЕЙ

С.В. Мазеин[1], А.С. Вознесенский[2], А.Н. Панкратенко[2]

[1] Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия
[2] НИТУ «МИСиС», e-mail: al48@mail.ru

Аннотация: Разработка насыщенных водой неустойчивых грунтов с компенсацией горного давления в забойной камере противодавлением опорной среды, создаваемым бентонитовой суспензией (гидропригрузом), содержит дополнительные возможности мониторинга для расширения своего применения. На объекте тоннельной проходки от ст. «Лефортово» до ст. «Авиамоторная» Московского метрополитена использована методика расчета запаса бентонитового пригруза, которая определяет коэффициент превышения компенсационного давления над действующим давлением со стороны грунтового массива в забое. Обсуждаются выборочные результаты дискретно-непрерывного мониторинга показателей осевого усилия на привод ротора тоннельной буровой машины. Полученные данные мониторинга использованы для выявления изменяющихся показателей предельного напряженного состояния грунта, степени его нарушения и насыщения грунтовыми водами, а также для поддержания давления пригруза вблизи заданного значения. Оценена возможность определять фактическую нагрузку от грунта и соотносить ее со значением компенсирующего давления бентонитовой суспензии. Выявлено, что для проходки в песках достаточно соблюдать значение коэффициента превышения компенсации больше 1, чтобы противодействовать смещению грунтового забоя во время остановки проходки. Снижение действующего коэффициента превышения компенсации приводит к тому, что усилие на привод ротора во время остановки повышается.

Ключевые слова: тоннель, тоннельная буровая машина, гидропригруз, бентонитовая суспензия, усилие, ротор, давление пригруза, дискретно-непрерывный мониторинг.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Мосинжпроект» (г. Москва).

Для цитирования: *Мазеин С. В., Вознесенский А. С., Панкратенко А. Н.* Мониторинг бентонитового пригруза для щитовой проходки тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 13–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-29.

Monitoring of bentonite dead weight in shield tunneling

S.V. Mazein[1], A.S. Voznesenskiy[2], A.N. Pankratenko[2]

[1] Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia
[2] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: al48@mail.ru

Abstract: This article discusses potential expansion of monitoring capabilities in tunneling in water-cut unstable soil with compensation of rock pressure in tunnel heading by the supporting medium backpressure created by bentonite suspension (hydro dead weight). In the tunneling site between metro stations Lefortovo and Aviamotornaya in Moscow, the bentonite dead weight is calculated by the procedure determining excess factor of the compensation backpressure over the pressure from the soil mass in the face zone. Sample results of discrete–continuous monitoring of thrust load on the tunneling machine rotor are discussed. The monitoring data are used to find changes

© С.В. Мазеин, А.С. Вознесенский, А.Н. Панкратенко. 2019.

in the indices of limiting stress state of soil, soil mass quality and ground water saturation rate, as well as to maintain the dead weight pressure at the preset value. It is assessed whether it is possible to determine actual load from soil for correlating with the compensation backpressure of bentonite suspension. It is found that in tunneling in sand, it is sufficient to maintain the compensation pressure excess factor higher than 1 in order to prevent from soil face displacement at breaks in the tunneling process. The lower backpressure excess factor will result in the increased load on the rotor drive during breaks.

Key words: tunnel, tunnel boring machine, hydro dead weight, bentonite suspension, load, rotor, dead weight pressure, discrete–continuous monitoring.

Acknowledgements: The study was supported by Mosinzhproekt.

For citation: Mazein S.V,, Voznesenskiy A. S., Pankratenko A. N. Monitoring of bentonite dead weight in shield tunneling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):13-29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-13-29.

Введение

Для щитовой проходки тоннелей широко применяются современные тоннельные буровые машины (ТБМ). Головная часть ТБМ, проходческий щит, имеет форму цилиндра с вращающимся в передней части режущим ротором, разрабатывающим круглое сечение тоннеля.

Одна из разновидностей щита разрабатывает насыщенные водой неустойчивые грунты с компенсацией горного давления в забойной камере противодавлением опорной среды, создаваемым бентонитовой суспензией (гидропригрузом) [1]. Контроль усилий домкратов прижима ротора к забою осуществляется датчиками давления в гидравлической системе ТБМ.

В работе [2] исследованы вариации усилия подачи привода ротора при проходке перегонного тоннеля метро, изложены рекомендации по расчету усредненных за цикл значений коэффициента превышения давления гидропригруза.

В научных публикациях о примерах эксплуатации ТБМ содержатся выводы о более эффективной работе гидропригруза, чем другой разновидности — грунтопригруза, особенно в несвязных грунтах, насыщенных водой [3].

Поскольку давление гидропригруза может поддерживаться в постоянном значении, то возникают идеальные условия для противодействия давлению и ограничения смещения неустойчивого грунтового массива в забойную камеру щита. При этом создаются предпосылки для полного нагнетания раствора за тоннельную обделку [4, 5] и для минимизации осадки земной поверхности над щитом [6, 7].

Опыт тоннелестроения показывает, что есть серьезные предпосылки для широкого применения гидропригрузных щитов, особенно при строительстве метро в Москве [8].

Доля проходки такими щитами составляет менее 4% от общей протяженности проходки, хотя в мире по нашим данным 2004 г. щиты с гидропригрузом строят 18% тоннелей, а, к примеру, в Турции по данным 2014 г. [9] — 30%, в Сингапуре по данным 2018 г. [10] — 40% тоннелей.

Замечено, что гидропригруз является предпочтительнее грунтопригруза для проходки диаметром D в водонасыщенных песках [11, 12], под реками [13, 14], при мощности породного перекрытия тоннеля 0,7...1,5D [15], при планируемом выполнении кессонных работ [16, 17]. Для повышения эффективности применения гидропригруза необходим мониторинг состава бентонитовой суспензии [18], а также ее расхода и давления [19].

Целью настоящей публикации является анализ мониторинга давления гидро-

Рис. 1. План перегонных тоннелей
Fig. 1. Plan of subway tunnels

пригруза на примере проходки левого перегонного тоннеля (ЛПТ) от ст. «Лефортово» до ст. «Авиамоторная» (рис. 1 и рис. 2) при строительстве Северо-Восточного участка Третьего пересадочного контура (ТПК) Московского метрополитена.

Объект исследований

При строительстве левого перегонного тоннеля от ст. «Лефортово» до ст. «Авиамоторная» с помощью ТБМ S-290 фирмы «Херренкнехт АГ» с гидропригрузом были предоставлены данные дискретно-непрерывного мониторинга параметров проходки ТБМ, архивируемые бортовым компьютером щита.

Полученные данные мониторинга используются для выявления изменяющихся показателей предельно напряженного состояния грунта, степени его наруше-

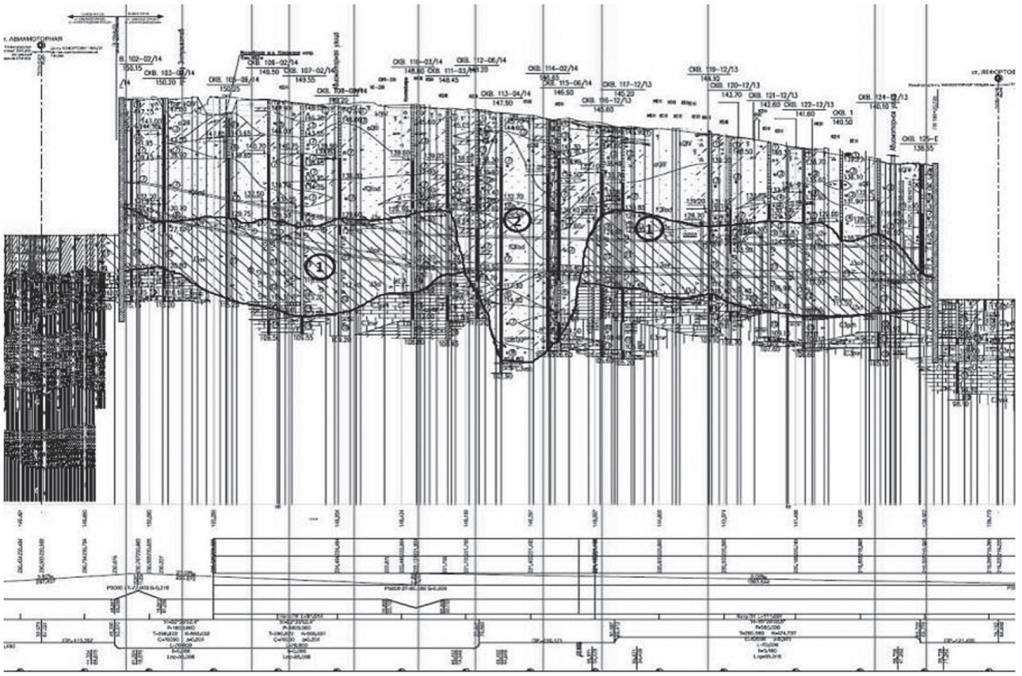

Рис. 2. Геологический профиль левого перегонного тоннеля (ЛПТ): 1 — глина, 2 — песок
Fig. 2. Geological profile of left subway tunnel: 1 —clay, 2 —sand

ния и насыщения грунтовыми водами, а также для поддержания давления пригруза вблизи заданного значения.

В работе [20] определено, что значения частот и периодов спектральных максимумов нагрузок на забой, полученные в результате численного моделирования, близки к значениям, установленным по натурным наблюдениям усилия прижима ротора по трассе тоннеля.

Периодичное изменение горизонтальных напряжений следует учитывать при проходке для поддержания адекватного давления бентонитового пригруза со стороны щита. Важность соответствия давления пригруза горному давлению покажем на примере строительства указанного выше объекта.

Методы исследований

В работе [2] описаны методы контроля давления грунта и опорной среды (бентонитовой суспензии) в забое гидропригрузного щита. По данным дискретно-непрерывных замеров прижимных усилий ротора разработана методика расчета запаса пригруза, которая была использована в нашей работе.

Для обеспечения баланса компенсации горизонтальной составляющей давления P от вертикального обнажения массива был рекомендован текущий корректирующий расчет коэффициента превышения компенсационного давления на основе результатов измерений прижимной нагрузки N ротора.

Для этого во время проходки рассчитывался среднеарифметический показатель усилия прижима ротора N^{A}_{VA}, а во время монтажа обделки выбиралось минимальное значение прижимной нагрузки N^{M}_{MIN}. Действующий коэффициент превышения компенсации принимался как $K = N^{M}_{MIN} / (N^{A}_{VA} - N^{M}_{MIN})$.

Для определения правильности расчета рекомендуемых значений давления гидропригруза по трассе тоннеля большое значение имеет их сравнение с фактически получаемыми значениями.

В первой части исследования для сравнения с рекомендуемыми значениями давлений пригруза в лотке ($P_{теор}^{лоток}$)

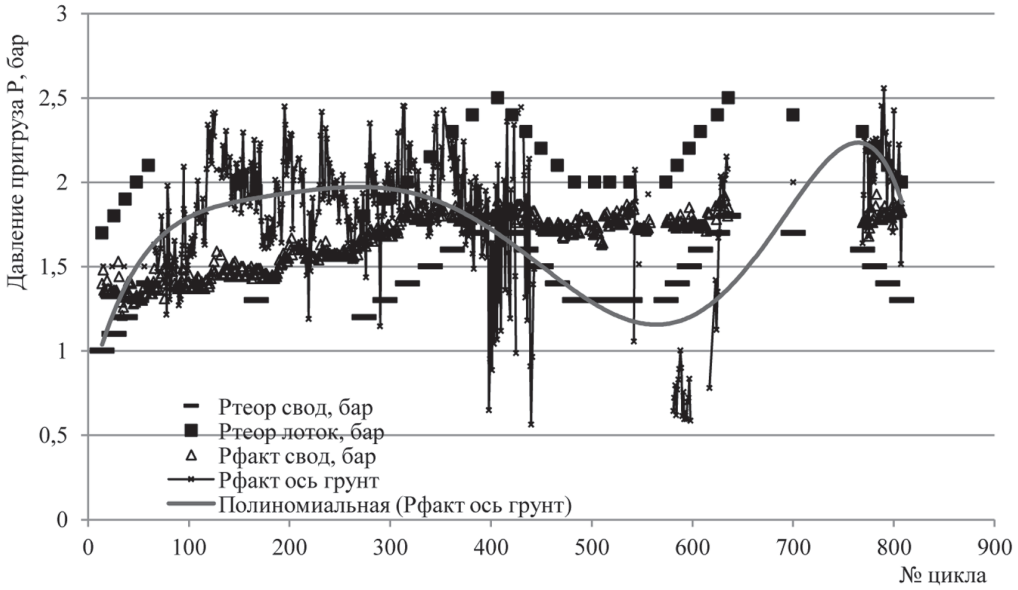

Рис. 3. Фактические и теоретические значения давлений гидропригруза по трассе тоннеля
Fig. 3. Actual and theoretical bentonite pressures along the tunnel route

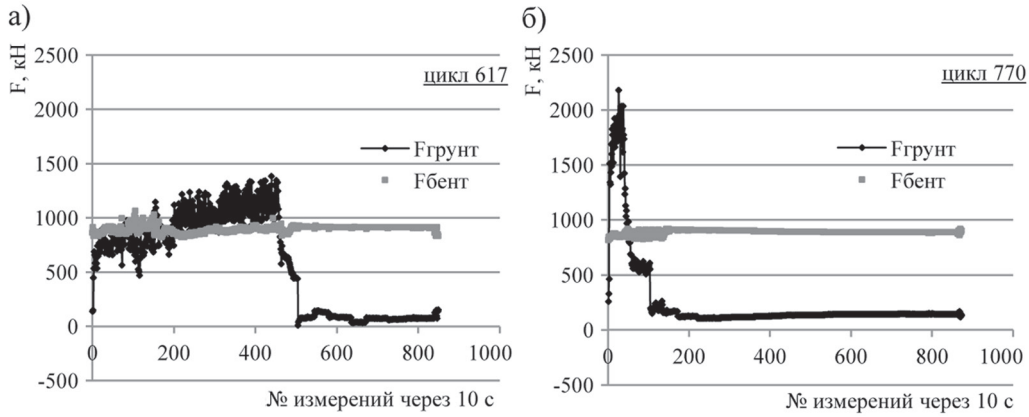

Рис. 4. Осевые усилия на привод ротора: от песка $F_{грунт}$; от бентонита $F_{бент}$; K = 1,28 (а); K = 0,79 (б)
Fig. 4. Axial force on the rotor drive: from sand F_{grunt}; from the bentonite F_{bent}; a–K = 1,28; b–K = 0,79

и своде забоя ($P_{теор}^{свод}$), приведенными в Технологическом регламенте проходки, анализировались показания (усредненные за цикл проходки) датчика, расположенного на высоте свода щита ($P_{факт}^{свод}$).

Во второй части исследования в соответствии с методикой [2] анализировались результаты дискретно-непрерывного мониторинга показателей осевых усилий (прижимной нагрузки от грунта $F_{грунт}$) на привод ротора, которые сопоставлялись с рассчитываемой нагрузкой от давления бентонитовой суспензии $F_{бент}$.

Полученные результаты

Результаты сравнения рекомендуемых теоретических и фактических значений давлений *P*, усредненных за цикл проходки, приведены на графиках рис. 3. Наиболее важным показателем для соблюдения равновесия давления являлось значение по датчику давления в своде забоя.

Фактические значения давления пригруза Рфактсвод по датчику в своде забоя ТБМ при режиме проходки находились в 99% случаев выше теоретически рекомендуемых значений для свода забоя Ртеорсвод.

Это позволяет сделать заключение о фактическом соблюдении (при допускаемом незначительном превышении) рекомендуемой диаграммы давления пригруза на участке тоннеля от ст. «Лефортово» до ст. «Авиамоторная». Вместе с тем фактическое горизонтальное давление от грунта $P_{факт.грунт}^{ось}$, измеренное датчиками давления в домкратах прижима ротора, имело среднеквадратическое отклонение 16%, которое значительно выше среднеквадратического отклонения 8% расчетного давления компенсации. Это говорит о важности текущего контроля соответствия давления пригруза горизонтальной составляющей горного давления.

Выборочные результаты дискретно-непрерывного мониторинга осевых усилий на привод ротора, складывающихся из передающейся через ротор нагрузки $F_{грунт}$ от грунта и $F_{бент}$ от давления бентонитовой суспензии, регистрируемой датчиками давления среды в забое, показаны через каждые 10 с на рис. 4.

Для анализа были выбраны циклы № 617 и № 770 (проходка и остановка в песке).

Обсуждение результатов

Снижение действующего коэффициента превышения компенсации с *K* = = 1,28 (цикл № 617) до *K* = 0,79 (цикл

№ 770) приводит к тому, что усилие на привод ротора во время остановки повышается с ~0 до ~150 кН, то есть противодействие бентонита смещению грунтового забоя становится недостаточным.

Для проходки в песках достаточно соблюдать значение коэффициента превышения компенсации больше 1, чтобы противодействовать смещению грунтового забоя во время остановки проходки.

При анализе обеспечения давления гидравлического пригруза по трассе тоннеля мы воспользовались возможностью определять фактическую нагрузку от грунта и соотносить ее со значением давления бентонитовой суспензии, что рекомендуется в методической литературе по механизированному тоннелестроению [11, 21, 22].

Выводы

На примере проходки левого перегонного тоннеля (ЛПТ) от ст. «Лефортово» до ст. «Авиамоторная» Московского метрополитена показаны возможности интерактивного мониторинга давления в забое, позволившего в реальном времени определять коэффициент превышения компенсационного давления над давлением, действующим со стороны грунтового массива в забое. В качестве иллюстрации представлены выборочные, полученные в двух циклах проходки результаты дискретно-непрерывного мониторинга значений горизонтальной нагрузки от песчаного грунта, передающейся через ротор, и нагрузки от давления бентонитовой суспензии, регистрируемой датчиками давления среды в забое.

Описанные наблюдения дали возможность сделать заключение о фактическом соблюдении (при допускаемом незначительном превышении) рекомендуемой диаграммы давления пригруза на участке тоннеля и о важности текущего определения соответствия давления пригруза горизонтальной составляющей горного давления. Полученные результаты позволили сделать вывод, что при проходке в песках для противодействия смещению грунтового забоя во время остановки проходки достаточно соблюдать значение коэффициента превышения компенсации больше 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мазеин С.В.*, *Вознесенский А.С.* Опыт тоннельной щитовой проходки с гидропригрузом // Метро и тоннели. — 2019. — № 1. — С. 14—17.

2. *Мазеин С.В.*, *Федунец Б.И.*, *Вознесенский А.С.* Мониторинг отпора и объема грунта в тоннеле при щитовой проходке с бентонитовым пригрузом // Метро и тоннели. — 2015. — № 3. — С. 18—21.

3. *Fritz P.* Additives for Slurry Shields in Highly Permeable Ground // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2007. No 40 (1). pp. 81—95.

4. *Cimiotti C.*, *Bono R.*, *Fioravanti P.* Lake Mead — Intake Tunnel No. 3 Pre-Excavation Grouting Challenges Using a High Pressure Slurry TBM. In: Grouting 2017: Grouting, Drilling, and Verification. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017. pp. 325—337.

5. *Mooney M.A.*, *Grasmick J.*, *Kenneally B.*, *Fang Y.* The role of slurry TBM parameters on ground deformation: Field results and computational modelling // Tunneling and Undergraund Space Technology. 2016. No 57 (8). pp. 257—264.

6. *Mei Z.*, *He T.*, *Zhou S.*, *Wang B.*, *Wang C.* Large-Diameter Slurry TBM Tunneling-Induced Settlements: The Case of the Yangtze River Tunnel of Nanjing New Line 10 / In: 15th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2015. pp. 1599—1611. DOI:10.1061/9780784479292.147.

7. *Park H.*, Oh J-Y., *Kim D.*, *Chang S.* Monitoring and Analysis of Ground Settlement Induced by Tunnelling with Slurry Pressure-Balanced Tunnel Boring Machine // Advances in Civil Engineering. Volume 2018, Article ID 5879402, pp. 1—10. DOI:10.1155/2018/5879402.

8. *Макаревич Г.В.* Щиты с грунто- и гидропригрузом. Преимущества и недостатки работы ТПМК с различными пригрузами забоя // Метро и тоннели. — 2004. — № 1. — С. 22—25.

9. *Ates U.*, *Bilgin N.*, *Copur H.* Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects // Tunnelbng and Underground Space Technology. 2014. Feb; 40. pp. 46—63.

10. *Chuan J.*, *Marotta M.*, *Nam O.* 2018. Excavation Management System for Slurry TBM in Singapore // Paper proceedings. ITA — AITES World Tunnel Congress. 21—26 April 2018. Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE. pp. 3120—3133.

11. СТО НОСТРОЙ 2.27.19-2011. Освоение подземного пространства. Сооружение тоннелей тоннелепроходческими механизированными комплексами с использованием высокоточной обделки. — М., 2012.

12. *Bezuijen A.* The influence of grout and bentonite slurry on the process of TBM tunneling // Geomechanik und Tunnelbau. 2009, Jun; 2(3). pp. 294—303.

13. *Rengshausen R.*, *Tauriainen R.*, *Raedle A.* TBM and spoil treatment selection process — case history Crossrail C310 Thames Tunnel // Geomechanik und Tunnelbau. 2014, Feb; 7(1). pp. 45—54.

14. *Klitzen J.*, *Herdina J.* Hydroshield drive with a diameter of 13 m in the Lower Inn Valley — Project design and experience from construction of contract H3-4 / Hydroschildvortrieb mit 13 m Durchmesser im Unterinntal — Projektplanung und Erfahrungen im Baulos H3-4. Geomechanik und Tunnelbau. 2016, Oct.; 9(5). pp. 534—546.

15. *Zhang Z.X.*, *Hu X.Y.*, *Scott K.D.* A discrete numerical approach for modeling face stability in slurry shield tunneling in soft soils // Computers and Geotechnics. 2011, Jan; 38(1). pp. 94—104.

16. *Wendl K.*, *Scholz M.*, *Thuro K.* Charakterisierung der ingenieurgeologischen Vortriebsdokumentation von Hydroschild-vortrieben am Beispiel der Baulose H3-4 und H8 im Unterinntal // Geotechnik. 2012, Sep; 35(3). pp. 168—176.

17. *Cimiotti C.*, *Bono R.*, *Fioravanti P.* Lake Mead — Intake Tunnel No. 3 Pre-Excavation Grouting Challenges Using a High Pressure Slurry TBM / In: Grouting 2017. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2017. pp. 325—337.

18. *Zumsteg R.*, *Puzrin A.M.*, *Anagnostou G.* Effects of slurry on stickiness of excavated clays and clogging of equipment in fluid supported excavations // Tunneling and Underground Space Technology. 2016, Sep.; 58. pp. 197—208.

19. *Duhme R., Rasanavaneethan R., Pakianathan L., Herud A.* Theoretical basis of slurry shield excavation management system // Tunneling and Underground Space Technology. 2016, Aug.; 57. pp. 211—224.

20. *Мазеин С.В.*, *Вознесенский А.С.* Мониторинг усилий прижима ротора и давления мягких грунтов при щитовой проходке тоннелей // Геотехника. — 2014. — № 1. — С. 44—51.

21. *Руководство* по проектированию и строительству тоннелей щитовым методом. Перевод с англ. В.Е. Меркина, В.П. Самойлова. — М.: Метро и тоннели, 2009. — 448 с.

22. *Механизированная* проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством / Под ред. В. Гульельметти, П. Грассо, А. Махтаба, Ш. Сю; «Geodata S.p.A.», Турин, Италия. — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. — 602 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Mazein S.V., Voznesenskiy A.S. Experience of shield tunneling with hydro dead weight. *Metro i tonneli*. 2019, no 1, pp. 14—17. [In Russ].

2. Mazein S.V., Fedunets B.I., Voznesenskiy A.S. Monitoring of pressure and volume of soil in shield tunneling with bentonite dead weight. *Metro i tonneli*. 2015, no 3, pp. 18—21. [In Russ].

3. Fritz P. Additives for Slurry Shields in Highly Permeable Ground. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2007. No 40 (1). pp. 81—95.

4. Cimiotti C., Bono R., Fioravanti P. Lake Mead — Intake Tunnel No. 3 Pre-Excavation Grouting Challenges Using a High Pressure Slurry TBM. In: *Grouting 2017: Grouting, Drilling, and Verification*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017. pp. 325—337.

5. Mooney M.A., Grasmick J., Kenneally B., Fang Y. The role of slurry TBM parameters on ground deformation: Field results and computational modelling. *Tunneling and Undergraund Space Technology*. 2016. No 57 (8). pp. 257—264.

6. Mei Z., He T., Zhou S., Wang B., Wang C. Large-Diameter Slurry TBM Tunneling-Induced Settlements: The Case of the Yangtze River Tunnel of Nanjing New Line 10. In: *15th COTA International Conference of Transportation Professionals*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2015. pp. 1599—1611. DOI:10.1061/9780784479292.147.

7. Park H., Oh J-Y., Kim D., Chang S. Monitoring and Analysis of Ground Settlement Induced by Tunnelling with Slurry Pressure-Balanced Tunnel Boring Machine. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2018, Article ID 5879402, pp. 1—10. DOI:10.1155/2018/5879402.

8. Makarevich G.V. Shields with soil and hydro dead weights. Tunnel boring systems with different dead weights on face: Advantages and shortcomings. *Metro i tonneli*. 2004, no 1, pp. 22—25. [In Russ].

9. Ates U., Bilgin N., Copur H. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunnelbng and Underground Space Technology*. 2014. Feb; 40. pp. 46—63.

10. Chuan J., Marotta M., Nam O. 2018. Excavation Management System for Slurry TBM in Singapore. Paper proceedings. *ITA — AITES World Tunnel Congress. 21—26 April 2018*. Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE. pp. 3120—3133.

11. *STO NOSTROY 2.27.19-2011. Osvoenie podzemnogo prostranstva. Sooruzhenie tonneley tonneleprokhodcheskimi mekhanizirovannymi kompleksami s ispol'zovaniem vysokotochnoy obdelki* [СТО НОСТРОЙ 2.27.19-2011. [Builders Standards STO NOSTROI 2.27.19-2011. Development of underground space. Tunneling with tunnel boring machines and high-accuracy lining], Moscow, 2012.

12. Bezuijen A. The influence of grout and bentonite slurry on the process of TBM tunneling. *Geomechanik und Tunnelbau*. 2009, Jun; 2(3). pp. 294—303.

13. Rengshausen R., Tauriainen R., Raedle A. TBM and spoil treatment selection process — case history Crossrail C310 Thames Tunnel. *Geomechanik und Tunnelbau*. 2014, Feb; 7(1). pp. 45—54.

14. Klitzen J., Herdina J. Hydroshield drive with a diameter of 13 m in the Lower Inn Valley — Project design and experience from construction of contract H3-4. Hydroschildvortrieb mit 13 m Durchmesser im Unterinntal — Projektplanung und Erfahrungen im Baulos H3-4. *Geomechanik und Tunnelbau*. 2016, Oct.; 9(5). pp. 534—546.

15. Zhang Z.X., Hu X.Y., Scott K.D. A discrete numerical approach for modeling face stability in slurry shield tunneling in soft soils. *Computers and Geotechnics*. 2011, Jan; 38(1). pp. 94—104.

16. Wendl K., Scholz M., Thuro K. Charakterisierung der ingenieurgeologischen Vortriebsdokumentation von Hydroschild-vortrieben am Beispiel der Baulose H3-4 und H8 im Unterinntal. *Geotechnik*. 2012, Sep; 35(3). pp. 168—176.

17. Cimiotti C., Bono R., Fioravanti P. Lake Mead — Intake Tunnel No. 3 Pre-Excavation Grouting Challenges Using a High Pressure Slurry TBM. In: *Grouting 2017*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2017. pp. 325—337.

18. Zumsteg R., Puzrin A.M., Anagnostou G. Effects of slurry on stickiness of excavated clays and clogging of equipment in fluid supported excavations. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2016, Sep.; 58. pp. 197—208.

19. Duhme R., Rasanavaneethan R., Pakianathan L., Herud A. Theoretical basis of slurry shield excavation management system. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2016, Aug.; 57. pp. 211—224.

20. Mazein S.V., Voznesenskiy A.S. Monitoring of rotor pressure and soft soil pressure in shield tunneling. *Geotekhnika*. 2014, no 1, pp. 44—51. [In Russ].

21. *Rukovodstvo po proektirovaniyu i stroitel'stvu tonneley shchitovym metodom*. Perevod s angl. V.E. Merkina, V.P. Samoylova [Shield tunneling design and implementation guidelines. English–Russian translation Merkina V.E., Samoylova V.P.], Moscow, Metro i tonneli, 2009, 448 p.

22. *Mekhanizirovannaya prokhodka tonneley v gorodskikh usloviyakh. Metodologiya proektirovaniya i upravleniya stroitel'stvom*. Pod red. V. Gul'elmetti, P. Grasso, A. Makhtaba, Sh. Syu; «Geodata S.p.A.», Turin, Italiya [Machine-assisted tunneling in urban conditions. Design and construction control methodology. Gul V.'elmetti, Grasso P., Makhtaba A., Sh. Syu (Eds.); «Geodata S.p.A.», Turin, Italy], Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013, 602 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазеин Сергей Валерьевич — д-р техн. наук, профессор,
Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), e-mail: maz-bubn@mail.ru,
Вознесенский Александр Сергеевич[1] — д-р техн. наук, профессор, e-mail: al48@mail.ru,
Панкратенко Александр Никитович[1] — д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой, e-mail: pankrat54@bk.ru,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Вознесенский А.С., e-mail: al48@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.V. Mazein, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: maz-bubn@mail.ru,
Russian University of Transport (RUT-MIIT),
A.S. Voznesenskiy[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: al48@mail.ru,
A.N. Pankratenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair, e-mail: pankrat54@bk.ru,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.S. Voznesenskiy, e-mail: al48@mail.ru.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

(№ 1196/07—19 от 28.05.2019; 11 с.)

Карпенко Сергей Михайлович[1] — канд. техн. наук, доцент,
Яров Алексей Борисович[1] — магистрант,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».

Приведены данные об электропотреблении на нефтеперерабатывающем предприятии ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез». Приведены результаты корреляционно-регрессионного и статистического анализа электропотребления. Выявлены промышленные установки, удельное электропотребление которых имеет наиболее тесную связь с объемами производства. Определены основные статистические показатели по электропотреблению и производству продукции. Выполнен сравнительный анализ по двухвыборочному критерию Колмогорова-Смирнова. Для прогнозирования электропотребления построена качественная, статистически значимая по критериям Фишера и Стьюдента, мультипликативная модель с сезонностью и линейным трендом, имеющая хорошие прогностические свойства и высокую точность (2,1%).

Ключевые слова: нефтеперерабатывающее предприятие, электропотребление, методы моделирования, календарное планирование, статистический анализ, корреляционно-регрессионный анализ, прогнозное моделирование, критерий Колмогорова-Смирнова, критерий Фишера, критерий Стьюдента.

ANALYSIS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN OIL REFINERIES

S.M. Karpenko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
A.B. Yarov[1], Master's Degree Student,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The article presents data on power consumption at the refinery of LLC «LUKOIL-Nizhegorodnefteorgsintez». The results of correlation-regression and statistical analysis of power consumption are presented. Identified industrial plants, the specific power consumption of which has the closest relationship with the volume of production. The main statistical indicators on power consumption and production are defined. A comparative analysis of the Kolmogorov-Smirnov two-sample criterion was performed. To predict power consumption, a qualitative, statistically significant according to the criteria of Fisher and student, multiplicative model with seasonality and linear trend, having good prognostic properties and high accuracy (2.1%) was built.

Key words: oil refinery, electricity consumption, modeling methods scheduling, statistical analysis, correlation and regression analysis, predictive modeling, Kolmogorov-Smirnov test, Fisher criterion, Student criterion.