Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 2

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Исследования железнодорожных насыпей с точки зрения физико-химической механики проводились разрозненно, без создания взаимосвязанной модели устойчивости слоистых систем, учитывающей все определяющие факторы. В статье показано, что внимание следует уделить изучению процесса размывания границ «гранулы щебня — слой песка», «слой песка — суглинок или глина» при движении грузовых поездов, а также граничной устойчивости слоистой гранулированной системы.

Ключевые слова: глинистый грунт; динамические нагрузки; позучесть и деформационное осажение; граничная устойчивость слоистых систем

Введение. На основе теории динамики деформирования сыпучих сред [1], таких как щебень и песок, и физико-механических свойств глинистых грунтов рассмотрена взаимосвязь их упруговязких характеристик и влияние на динамику волнообразных просадок земляного полотна.

Физико-химические свойства глинистых грунтов. Зависимость структуры глинистых грунтов от физико-химических условий (температуры, влажности, пористости) П. А. Ребиндер предложил подразделить на два основных типа [2]: 1) коагуляционно-тиксотропные и 2) конденсационно-кристаллизационные связи. В качестве примера коагуляционно-тиксотропных структур можно привести глиняную пасту, широко используемую при бурении нефтяных скважин. В конденсационно-кристаллизационных структурах частицы соединены без разделения их водной пленкой. Под конденсационными связями подразумеваются сухие контакты между частицами; такие контакты возникают при сближении частиц в результате испарения влаги [2].

Процесс деформационной тиксотропии. Деформационная тиксотропия — быстрое разрушение структуры среды и снижение предельного напряжения сдвига до нуля, проявляется в существенном запаздывании (на 2–10 ч) деформации от производной вектора напряжения. В результате накапливается энергия напряжений в глинистой среде, и уже после прохождения нескольких поездов начинаются деформационные изменения земляного полотна. Причина деформационной тиксотропии заключается в быстром

изменении структуры коллоидов во влажном глинистом грунте, переориентации плоских глинистых частиц в поле напряжений и после снятия нагрузки в медленном диффузионном восстановлении прежнего равновесного состояния. При наличии природных неоднородностей строения и плотности подстилающих грунтов особенно во влажные периоды, нарушениях технологии сооружения насыпи тиксотропия проявляется в образовании волнообразных просадок грунта с изменением динамических нагрузок из-за колебаний системы «тележка — вагон».

По опытным данным структурная вязкость глинистых грунтов имеет разброс значений от 10^5 до 10^{16} Па·с [3, 4, 5]. Вязкость глин полутвердой консистенции была определена в пределах 10^{11} – 10^{13} Па·с, глины с влажностью 25 % — $5 \cdot 10^{13}$ Па·с. Супесь, суглинки и глина начинают проявлять вязкопластические свойства при относительной влажности соответственно 70, 55, 40 и 30 %. Перенос молекул воды в плотных глинистых грунтах происходит по диффузионному механизму [6], в пористых глинистых грунтах — по термокапиллярному механизму, впервые предложенному П. И. Дыдышко [7].

Стадия прогрессирующего течения у пластичных глинистых грунтов с водно-коллоидными связями возникает при нагрузках, составляющих 40–70 % от кратковременной прочности, и развивается длительное время, заканчиваясь разрушением, как правило, вязким [2, 3]. У плотных глинистых грунтов со смешанными коагуляционными и кристаллизационными связями преобладает стадия затухающего деформирования. Прогрессирующая стадия возникает при напряжениях 70–80 % и более от кратковременной прочности, притом переход от затухающего к прогрессирующему деформированию наблюдается в большинстве случаев без стадии установившегося течения. При этом относительная продолжительность прогрессирующей стадии незначительная, а разрушение преимущественно хрупкое [2, 5].

Ползучесть глинистых грунтов является следствием не только наличия водных пленок, окружающих твердые частицы. Конечно, эти пленки, обладающие явно выраженными вязкими свойствами, существенно способствуют развитию реологических процес-

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (В. М. Бельков)

сов в водонасыщенных дисперсных грунтах с водно-коллоидными связями. Однако и конденсационные связи между минеральными частицами при «сухом контакте», обусловленные межмолекулярными силами ближнего действия, оказывают вязкое сопротивление смещению частиц.

Исследования показывают, что полная деформация глинистого грунта в общем случае состоит из четырех составляющих [3, 4, 5]:

- мгновенная упругая обратимая деформация;
- мгновенная остаточная необратимая деформация;
- длительная упругая обратимая деформация;
- длительная остаточная необратимая деформация.

Мгновенная упругая обратимая и остаточная необратимая деформация протекает со скоростью звука для данного материала [3, 4], причем остаточная необратимая деформация тем больше, чем выше нагрузка. Мгновенная остаточная необратимая деформация подчиняется закону Шведова — Бингама, т. е. процесс течения начинается при превышении предельного напряжения сдвига, являющейся функцией влажности среды и скорости изменения нагрузки.

Длительная упругая обратимая деформация, как показали опыты [2, 3, 4, 5], практически линейно связана с напряжением и поэтому подчиняется принципу независимости действия сил так же, как и мгновенная упругая обратимая деформация. Описанный тип обратимой деформации проявляется за счет восстановления водно-коллоидных связей в глинистой среде, протекающей по диффузионному механизму, и может длиться от 3 до 10 часов [8, 9, 10, 11]. Длительная остаточная необратимая деформация тем больше, чем выше влажность глинистого грунта.

Кроме рассмотренных имеется еще ряд моделей, в которых, например, модели Сен-Венана и Больцмана — Вольтерры [12]. Для последней модели связь между напряжением и деформацией выражается в дифференциально-интегральной форме.

Явления виброкомпрессии и виброползучести. В практике строительства давно известны явления виброкомпрессии, которые выражаются в уплотнении рыхлых несвязных грунтов при вибрационных нагрузках [8, 9, 10, 13, 14, 15]. Механизм виброкомпрессии для глинистых грунтов проявляется в том, что динамическое воздействие на грунт приводит к разрушению его структуры и возникновению взаимного перемещения частиц. При увеличении частоты вибрации возникает явление виброползучести. В этом случае происходит накопление деформаций во времени, и осадки грунта развиваются без затухания.

В глинистых грунтах, особенно текучей консистенции, а также в песчаных грунтах различной крупности (особенно мелких и пылеватых) при динамических воздействиях может отмечаться тиксотропия — мгновенное разжижение грунта. При определенной частоте

колебаний межчастичное трение в сыпучих грунтах может настолько уменьшиться, что грунт приобретает свойства вязкой жидкости даже при малом количестве в нем воды из-за разрыва водно-коллоидных связей [5, 16, 17]. Измерения, выполненные Е. С. Ашпизом в 1998–1999 гг. на участке Санкт-Петербург — Москва, показали, что ударное воздействие на путь возникает от 16,5% проследовавших колесных пар грузовых вагонов [13, 14, 15]. При этом амплитуды смещений балластного слоя на уровне подошвы шпалы при движении грузового поезда со скоростью 80 км/ч могут составлять 500–770 мкм [13, 14].

Суффозия. При движении грузового поезда на земляное полотно в диапазоне частот 4 ... 10000 Гц действуют гармонические силы [17], воздействующие на динамику вязкоупругих свойств дисперсных слоев, что приводит к размыванию границ «гранулы щебня — слой песка», «слой песка — суглинок или глина». В действительности устойчивость границ слоистых дисперсных систем — задача динамики дисперсных тел и сплошных сред. Как показано в работах [18, 19], в поле гармонических напряжений среда с меньшей структурной вязкостью, т. е. песок, проникает в поровое пространство слоя щебня, а суглинок или глина в поровое пространство слоя песка. Основная причина дестабилизации — размывание границы «песчаный слой — слой щебня» из-за проникновения частиц песка в поровое пространство щебня (явление суффозии). При этом уменьшается пористость и снижается проницаемость щебеночного слоя, смещаются песчаные массы, в результате чего шпала проседает. Скорость суффозии повышается при увеличении влажности песчаной подушки и амплитуды вибрации.

Наибольшую угрозу с точки зрения безопасности движения поездов представляет размывание основной площадки и границы раздела песчаного защитного слоя обводненной глинистой средой. Такие явления наблюдаются при прокладке пути в низинах вблизи водоемов. Пробой может двигаться медленно вверх не один десяток лет. Именно по этим причинам возникла деформация насыпи (сдвигка) и, как следствие, в 2005 г. сход с рельсов 30 вагонов (цистерн) с горячим мазутом на перегоне Зубцов — Аристово Московского отделения Октябрьской железной дороги.

Процессы поглощения вязкопластических жидкостей пористыми средами моделировали на базе термодинамики необратимых процессов Онзагера [20, 21]. Неньютоновская жидкость начинает заполнять поровое пространство щебня или песка, когда напряжение по вертикальной оси превышает предельное напряжение сдвига $T_z > G_0$ (для уплотненных глинистых грунтов $G_0 = 0,03$ МПа, для уплотненных — $G_0 = 0,04–0,06$ МПа). Вибрационные поля увеличивают скорость подъема воды в капиллярах и пористых средах в десятки раз [6].

При нагрузке 30 тс на ось напряжение на основной площадке насыпи составляет 0,095 МПа [13, 14, 15]. При повышенной влажности глинистых грунтов предельное напряжение сдвига G_0 меньше напряжения на границе раздела. Поэтому возможна просадка песчаного слоя с последующим нарушением устойчивости земляного полотна за счет смазывающего свойства влажных глин и снижения структурной вязкости песчаного слоя.

Эффект электромагнитного студнеобразования. В заключении отметим еще один эффект, который даже не упоминается в железнодорожной науке. При исследованиях глинистых растворов и других систем были обнаружены деформационная тиксотропия, студнеобразование в сильных электромагнитных полях [11] (концентрация трехвалентного железа в призме достигает 5–10 г/кг балласта), наличие пристенного эффекта, который значительно увеличивает скорость потока увлажненной глины в суффозных капиллярах [6]. Электромагнитное студнеобразование, которое может наблюдаться на электрифицированных участках, имеет ту же причину возникновения: перестроение коллоидов суглинка в мощных электромагнитных полях, и как следствие, значительное изменение структурно-механических параметров глинистого грунта.

Выводы. 1. Вибрационные поля увеличивают скорость подъема воды в капиллярах и пористых средах в десятки раз. Поэтому вибрационные поля, возникающие при прохождении поездов, способствуют обводнению и проникновению глинистых грунтов в поровое пространство песка из-за значительного уменьшения структурной вязкости и величины предельного напряжения сдвига неньютоновской среды.

2. При исследованиях глинистых сред и других систем необходимо учитывать все эффекты: деформационную тиксотропию, студнеобразование в сильных электромагнитных полях, пристенные эффекты, которые значительно увеличивают скорость потока увлажненной глины в суффозных капиллярах песчаной подушки и щебеночном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков В. М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338.
2. Вязов С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1971. 368 с.

4. Методы прикладной вязкоупругости / А. А. Адамов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. 411 с.
5. Машенко А. В., Пономарев А. Б., Сычкина Е. Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. 176 с.
6. Чураев Н. В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых средах. М.: Химия, 1990. 272 с.
7. Дыдышко П. И. Земляное полотно железнодорожного пути: справочник. М.: Интекст, 2014. 415 с.
8. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
9. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 184 с.
10. Каменский В. Б. Совершенствование системы ведения путевого хозяйства в современных условиях работы железных дорог: автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.06. М., 2011. 23 с.
11. Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Нестационарные движения вязкопластических сред. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1977. 322 с.
12. Астарита Дж., Маруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 312 с.
13. Наумов В. В. Обеспечение работоспособности железнодорожных насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. М., 2013. 23 с.
14. Наумов В. В. Надежность земляного полотна на участках обращения тяжеловесных поездов // Вестник ДИИТ. 2009. № 5. С. 183–186.
15. Наумов В. В., Виноградов В. В. Земляное полотно при воздействии повышенных осевых нагрузок // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 1. С. 23–24.
16. Коншин Г. Г. Вибрационный метод диагностики насыпей // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 10. С. 22–25.
17. Определение деформации грунтового основания под действием временной нагрузки / Н. Е. Науменко [и др.] // Техническая механика. 2015. № 2. С. 71–78.
18. Рыбкина О. В. Об устойчивости движения границ раздела двух вязкопластических жидкостей // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», 17–22 сентября 2007 г. Новосибирск, 2007. С. 54–57.
19. Иванцов А. О. Численное исследование осредненных эффектов воздействия высокочастотных поступательных вибраций на неоднородные гидродинамические системы: автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Пермь. 2009. 25 с.
20. Бельков В. М., Шатов А. А. Математическая модель капиллярной пропитки пористых сред вязкопластическими жидкостями // Коллоидный журнал. 1992. Т. 54. № 3. С. 16–20.
21. Бельков В. М., Теплякова Е. А. Динамика миграции нефтепродуктов во влажных почвогрунтах // Проблемы железнодорожного транспорта, задачи и пути их решения: сб. тр. ученых ОАО ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2012. С. 207–215.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,
д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г., принята к публикации 19.10.2016 г.

Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 2

V. M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Research of railway embankments in terms of physical and chemical mechanics were conducted discretely, without the creation of a coherent model of stability of layered systems, taking into account all the determining factors. The article shows that attention should be focused on the process of blurring the boundaries "crushed stone granules – layer of sand", "layer of sand – loam or clay" when running freight trains as well as the limiting stability of layered granular system. The presence of natural inhomogeneities of structure and change in the density of the underlying soils, especially in wet periods, violations of construction technology of sugrade embankment, dynamic loads on the rails due to vibrations of "bogie – train" system leads to the formation of wave-like ground subsidence. Vibration fields generated in the water and viscoplastic fluids, increase the rate of rise of water in capillaries and porous media in dozens of times because of reduced hysteresis in the contact angle of wet and wall effects. Therefore, the vibration of the field arising from the train handling, contribute to flooding and penetration of clay soils in the pore space of sand due to a significant reduction of the structural viscosity and yield value of a non-Newtonian media. In studies of clay media and other systems all the effects should be taken into account: deformation thixotropy, "gelation" in strong electromagnetic fields, wall effects, which significantly increase the flow rate of hydrated clay in suffusion capillaries of sand and crushed stone cushion layer.

Keywords: clay soil; dynamic loads; plastic flow and draft deformation; coagulation - thixotropic structure; boundary stability of layered systems

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-61-64>

REFERENCES

1. Bel'kov V.M. *Modelirovanie uprugovязkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modeling elastoviscoplastic properties of subgrade. Statement of the problem 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338.
2. Vyalov S.S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov: ucheb. posobie dlya stroit. vuzov* [Rheological basics of soil mechanics: a manual for schools for construction engineers]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 1978, 447 p.
3. Gol'dshteyn M.N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov* [Mechanical properties of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 368 p.
4. Adamov A.A., Matveenko V.P., Trufanov N.A., Shardakov I.N. *Metody prikladnoy vyzkouprugosti* [Methods of applied visco-elasticity]. Yekaterinburg, URO RAN Publ., 2003, 411 p.
5. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychkina E.N. *Spetsial'nye razdely mekhaniki gruntov i mekhaniki skal'nykh gruntov. Ucheb. posobie* [Special sections of soil mechanics and mechanics of rocky soils. Tutorial]. Perm, Perm National Research Polytechnological University Publ., 2014, 176 p.
6. Churaev N.V. *Fiziko-khimiya protsessov massoperenosa v poristyykh sredakh* [Physics and chemistry of mass transfer in porous media]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, 272 p.
7. Dydyshko P.I. *Zemlyanoe polотно zheleznodorozhnogo puti: Spravochnik* [Subgrade of railway track: Reference book]. Moscow, Intext Publ., 2014, 415 p.
8. Shakhunyan G.M. *Zheleznodorozhnyi put'* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p.
9. Popov S.N. *Ballastnyy sloj zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow, Transport Publ., 1965, 184 p.
10. Kamenskiy V.B. *Sovershenstvovanie sistemy vedeniya putevoy khozaystva v sovremennykh usloviyakh raboty zheleznykh dorog. Kand. tekhn. nauk diss. Aftoref.* [Improving the

system of maintaining the track facilities in modern conditions of railways. Cand. tech. sci. diss. Synopsis]. Moscow, 2011, 23 p.

11. Ogibalov P.M., Mirzadzhanzade A.Kh. *Nestatsionarnye dvizheniya vyzkoplasticheskikh sred* [Nonstationary movements of visco-plastic media]. Moscow, Moscow State University Publ., 1977, 322 p.

12. Astarita G., Marucci G. *Osnovy gidromekhaniki nen'yutonovskikh zhidkostey* [Fundamentals of fluid mechanics of non-Newtonian fluids]. Moscow, Mir Publ., 1978, 312 p.

13. Naumov V.V. *Obespechenie rabotosposobnosti zheleznodorozhnykh nasypey na uchastkakh obrashcheniya poezdov s povyshennymi oseyimi nagruzkami. Kand. tekhn. nauk diss. Aftoref.* [Ensuring performance of railway embankments on sections with trains handling with high axial loads. Cand. tech. sci. diss. Synopsis]. Moscow, 2013, 23 p.

14. Naumov V.V. *Nadezhnost' zemlyanogo polotna na uchastkakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov* [Reliability of subgrade in sections handling heavy haul trains]. Vestnik DIIT, 2009, no. 5, pp. 183–186.

15. Naumov V.V., Vinogradov V.V. *Zemlyanoe polотно pri vozdeystvii povyshennykh oseyikh nagruzk* [Subgrade when exposed to increased axial loads]. Put' i putevoye khozaystvo [Railway track and facilities], 2011, no. 1, pp. 23–24.

16. Konshin G.G. *Vibratsionnyy metod diagnostiki nasypey* [Vibration method for monitoring embankments]. Put' i putevoye khozaystvo [Railway track and facilities], 2007, no. 10, pp. 22–25.

17. Naumenko N.E., Markova O.M., Kovtun E.N., Malyy V.V. *Opredeleniye deformatsii gruntovogo osnovaniya pod deystviem vremennoy nagruзки* [Detection of deformation of soil ground under influence of temporary loads]. Tekhnicheskaya mekhanika [Technical mechanics], 2015, no. 2, pp. 71–78.

18. Rybkina O.V. *Ob ustoychivosti dvizheniya granits razdela dvukh vyzkoplasticheskikh zhidkostey* [On stability of moving of separating limits of visco-plastic liquids]. Tezisy doklada konferentsii Problemy mekhaniki sploshnykh sred i fiziki vzryva [Paper abstracts. Problems of mechanics of continuous medium and explosion physics]. 17–22 September, Novosibirsk, 2007, pp. 54–57.

19. Ivantsov A.O. *Chislennoye issledovaniye osrednennykh efektov vozdeystviya vysokochastotnykh postupatel'nykh vibratsiy na neodnorodnye gidrodinamicheskiye sistemy. Kand. fiz.-mat. nauk. diss. Aftoref.* [Quantity research of averaging exposure effects on high frequency translation vibrations on non-homogenous hydro-dynamic systems. Cand. phys.-math. sci. diss. Synopsis]. Perm, 2009, 25 p.

20. Bel'kov V.M., Shatov A.A. *Matematicheskaya model' kapillarnoy poristyykh sred vyzkoplasticheskimi zhidkostyami* [Mathematical model of capillary intake of porous medium with visco-plastic liquids]. Kolloidnyi zhurnal [Colloidal journal], 1992, Vol. 54, no. 3, pp. 16–20.

21. Bel'kov V.M., Teplyakova E.A. *Dinamika migratsii nefteproduktov vo vlazhnykh pochvogruntakh* [Migration dynamic of oil-products in wet soil grounds]. Problemy zheleznodorozhnogo transporta, zadachi i puti ikh resheniya. Sb. tr. OAO "VNIIZhT" [Problems of railway transport, challenges and ways of solution. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Intext Publ., 2012, pp. 207–215.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Adviser, Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 27.07.2016

Accepted 19.10.2016

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V.M. Bel'kov)