УДК 624.131:551

**Ю.А.НОРВАТОВ**, *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, norvatov@mail.ru*
**И.Б.ПЕТРОВА**, *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, petrovar@mail.ru*
**М.В.СЕРГУТИН**, *научный сотрудник, msergutin@mail.ru*
*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**Ju.A.NORVATOV**, *Dr. in geol. & min. sc., chief research assistant, norvatov@mail.ru*
**I.B.PETROVA**, *PhD in geol. & min. sc., leading research assistant, petrovar@mail.ru*
**M.V.SERGUTIN**, *research assistant, msergutin@mail.ru*
*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

# ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ПРОХОДКЕ ЭСКАЛАТОРНОГО ТОННЕЛЯ НА СТАНЦИИ «АДМИРАЛТЕЙСКАЯ» САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Выполнен анализ результатов наблюдений за изменением гидростатических давлений и деформациями породного массива при проходке наклонного тоннеля с гидропригрузом забоя на станции «Адмиралтейская» Санкт-Петербургского метрополитена. Определены характеристики природно-техногенной гидрогеологической структуры, сформированной при подработке тоннелем толщи ледниковых отложений. Предложена методика оценки деформаций массива с учетом техногенных трещин расслоения и процессов разуплотнения-уплотнения глинистых пород при изменениях гидростатических давлений. Приведен пример расчета деформаций подработанного массива с использованием результатов наблюдений при проходке экскалаторного тоннеля.

***Ключевые слова:*** тоннель, проходческий комплекс, гидропригруз, гидростатическое давление, эффективные напряжения, мониторинг, прогноз деформаций.

# USE OF HYDROGEOMECHANICAL MONITORING DURING SHIELDING TUNNEL FOR UNDERGROUND STATION OF SAINT PETERSBURG SUBWAY «ADMIRALTEISKAYA»

Are investigated results obtained during supervision over change of hydraulic pressure and soil's deformation while shielding inclined tunnel with hydro-surcharge on the breast for Saint Petersburg underground station «Admiralteiskaya». Are defined characteristics of anthropogenic hydro geological structure generated while shielding glacial soils. Is offered methodology for estimation soil deformation taking into account anthropogenic cracks of stratification and compaction – decompaction processes of clay breeds while changing hydraulic pressures. Is presented an example of estimation deformations of soils influenced by shielding.

***Key words*:** tunnel, shield complex, hydro surcharge, hydraulic pressure, effective pressure, supervision, deformation forecast.

При проходке наклонного эскалаторного тоннеля на станции «Адмиралтейская» вскрывались современные насыпные и четвертичные отложения, а также верхние пласты глин котлинской подсвиты. Четвертичные отложения представлены в основном моренными супесями, суглинками, перекрытыми ленточными озерно-ледниковыми суглинками и постледниковыми озерно-морскими осадками песчано-глинистого состава, к которым приурочен приповерхностный водоносный комплекс. В период проходки наклонного тоннеля диаметром 10,6 м спецкомплексом с гидропригрузом забоя выполнялись наблюдения за изменением гидростатических давлений во вмещающем породном массиве и деформациями подрабатываемой толщи.

Для контроля состояния породного массива при проходке тоннеля были оборудованы пять наблюдательных станций – скважин с размещенными в них датчиками гидростати-

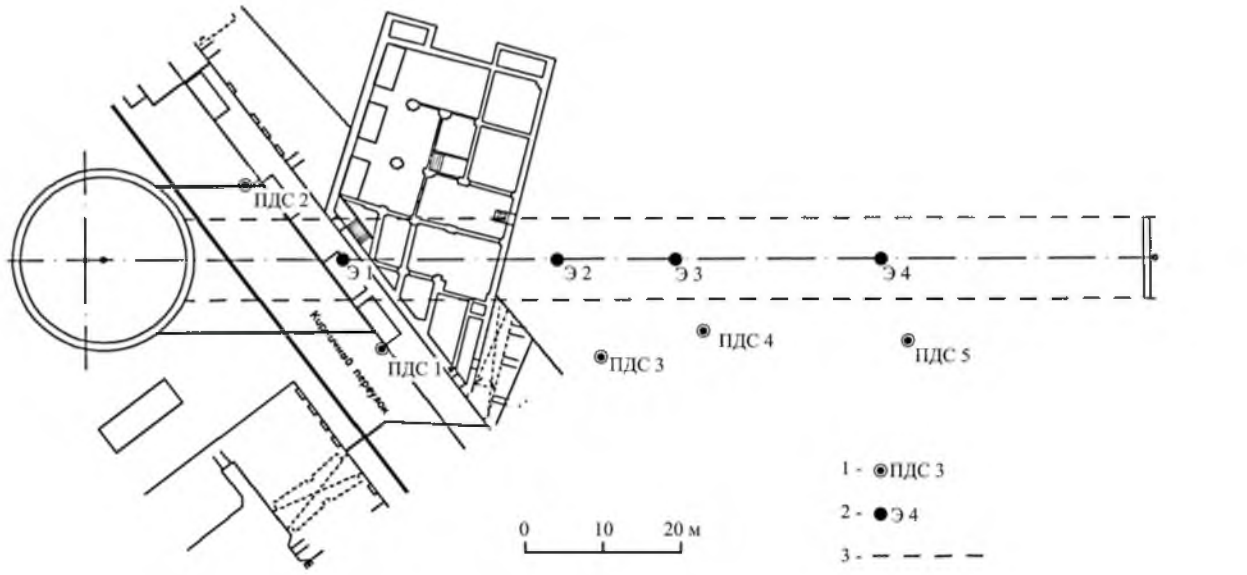



Рис.1. Схема расположения наблюдательных станций относительно наклонного тоннеля

1 – станции с датчиками гидростатического давления; 2 – станции с глубинными реперами; 3 – контуры тоннеля

ческого давления (ПДС1-ПДС5). Скважины глубиной от 10 до 60 м располагались в 3-5 м от контура тоннеля (рис.1). В скважинах размещались от одного до пяти датчиков гидростатического давления. Наблюдательная сеть включала также четыре скважины с размещенными в них глубинными реперами – экстензометрами (Э1-Э4). Кроме того, выполнялись наблюдения за оседаниями фундаментов подрабатываемых зданий.

Проходка тоннеля сопровождалась принудительным повышением гидростатических давлений на забое и соответствующим повышением гидродинамических давлений в песчано-глинистых породах, вскрываемых забоем, с целью предотвращения деформаций этих пород. Существенное повышение гидростатических давлений в породном массиве определялось также высокими давлениями, создаваемыми при подаче тампонажного раствора за обделку тоннеля для ликвидации пустот между обделкой и породным массивом.

Известно, что датчики гидростатического давления являются единственным техническим средством, позволяющим реально оценить напряженное состояние водонасыщенных породных массивов и изменение этого состояния под влиянием природных или техногенных факторов. Повышение гидростатических давлений в водонасыщенных массивах способствует эквивалентному снижению эффективных напряжений в породном массиве и деформациям разуплотнения глинистых пород с податливым скелетом. Снижение гидростатических давлений в породных массивах приводит к повышению эффективных напряжений в скелете, к компрессионным деформациям пород глинистого состава и возможным деформациям оседания земной поверхности*.

Наблюдения за распределением гидростатических давлений в породном массиве позволили оценить закономерности естественного гидродинамического режима подземных вод и характер его изменений при проходке наклонного тоннеля.

До начала проходки тоннеля установлено, что гидростатические напоры в различных элементах толщи четвертичных отложений близки и устанавливаются на глубинах 1,8-2,5 м от земной поверхности. Напор в верхней части толщи котлинских глин фиксируется на глубине 2,6 м от земной поверхности. По результатам наблюдений установлено влияние изменений атмосферного давления на синхронно изменяющуюся величину гидростатических давлений в породном массиве (рис.2). Амплитуда изменений гидростатических давлений в пределах 2-5 КПа определяется исключительно колебаниями атмосферного давления и не связана с воздействием техногенных факторов. Изменения естественного (фонового) распределения гидростатических давлений фиксируются во всех элементах гидрогеологической структуры, по-

* *Шестаков В.М.* Гидрогеомеханика. М., 1998.
*Shestakov V.M.* Hydrogeomechanics. Moscow, 1998.

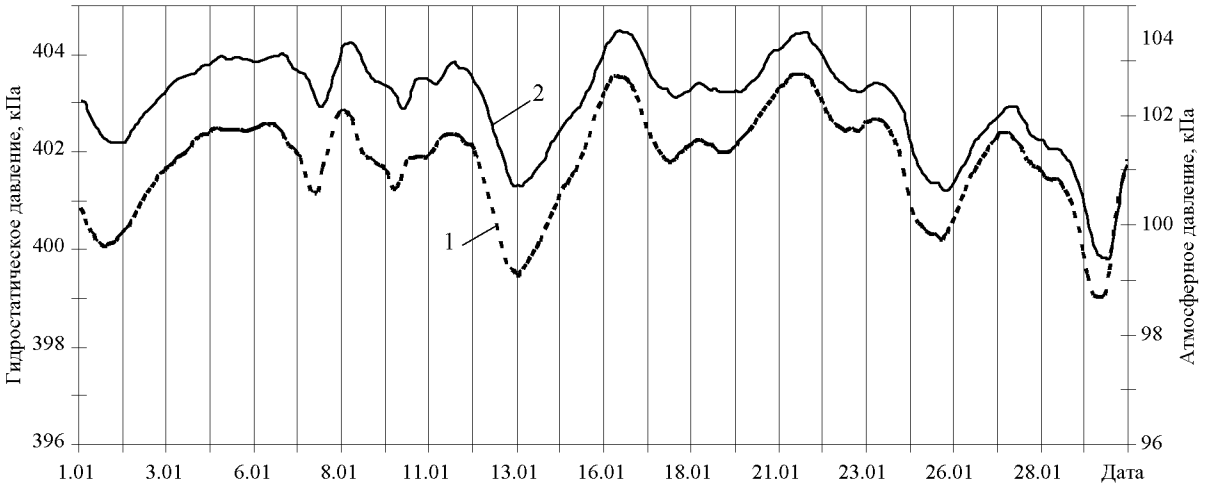



Рис.2. Хронологические графики изменений атмосферного (1) и гидростатического (2) давления на глубине 42 м от земной поверхности

этому можно сделать вывод об активной гидравлической связи этих элементов.

Влияние горно-технологических факторов на изменение естественного гидродинамического режима и соответствующие изменения напряженного состояния массива вмещающих тоннель пород прослежено по всем датчикам гидростатического давления. Автоматизированные замеры гидростатического давления и деформаций массива по глубинным реперам выполнялись с интервалом в 30 мин с использованием компьютерных технологий.

Изменения гидростатических давлений по датчикам наблюдались при подходе забоя тоннеля к станциям на расстояния, не превышающие 20-30 м.

Наиболее информативные результаты получены при наблюдениях по станции ПДС4, которая оборудована пятью датчиками гидростатического давления, размещенными во всех характерных элементах геологической структуры, включая котлинские отложения. Станция ПДС4 расположена в средней части наклонного тоннеля, где глубина заложения его подошвы составляет около 50 м. Деформации подработанного массива вблизи станции ПДС4 фиксировались по глубинным реперам (экстензометрам), размещенным в скважине Э3.

Графики изменений гидростатических давлений по датчикам станции ПДС4 при проходке тоннеля представлены на рис.3. Графики смещений глубинных реперов по станции Э3 при подработке толщи моренных отложений приведены на рис.4.

Отметим, что при проходке тоннеля до глубины около 40 м давления гидропригруза забоя превышали естественные гидростатические давления в породном массиве.

При подходе забоя тоннеля к станции ПДС4 давление гидропригруза на забое было снижено до 0,2 МПа при естественных (фоновых) гидростатических давлениях в массиве, равных 0,28-0,48 МПа на глубинах 30-50 м от земной поверхности.

Комментируя результаты наблюдений за деформациями подработанного массива, можно сделать следующие выводы:

• при проходке тоннеля над его сводом формируется зона техногенной нарушенности массива высотой 15-20 м;

• смещение глубинного репера, установленного на высоте около 3 м над сводом тоннеля, превышает 70 мм (экстензометр вышел из строя);

• деформации расслоения массива в интервале глубин 18-29 м от земной поверхности достигают 5 мм/м; существенно большие деформации расслоения вероятно формируются непосредственно над сводом тоннеля;

• суммарные деформации расслоения массива над сводом тоннеля вероятно превышают 100 мм.

Анализ результатов наблюдений за изменением гидростатических давлений дает возможность сформулировать следующие положения:

• при проходке тоннеля формируется природно-техногенная гидрогеологическая структура подработанного массива;

• зона техногенной нарушенности подработанного массива характеризуется повышенной проницаемостью;

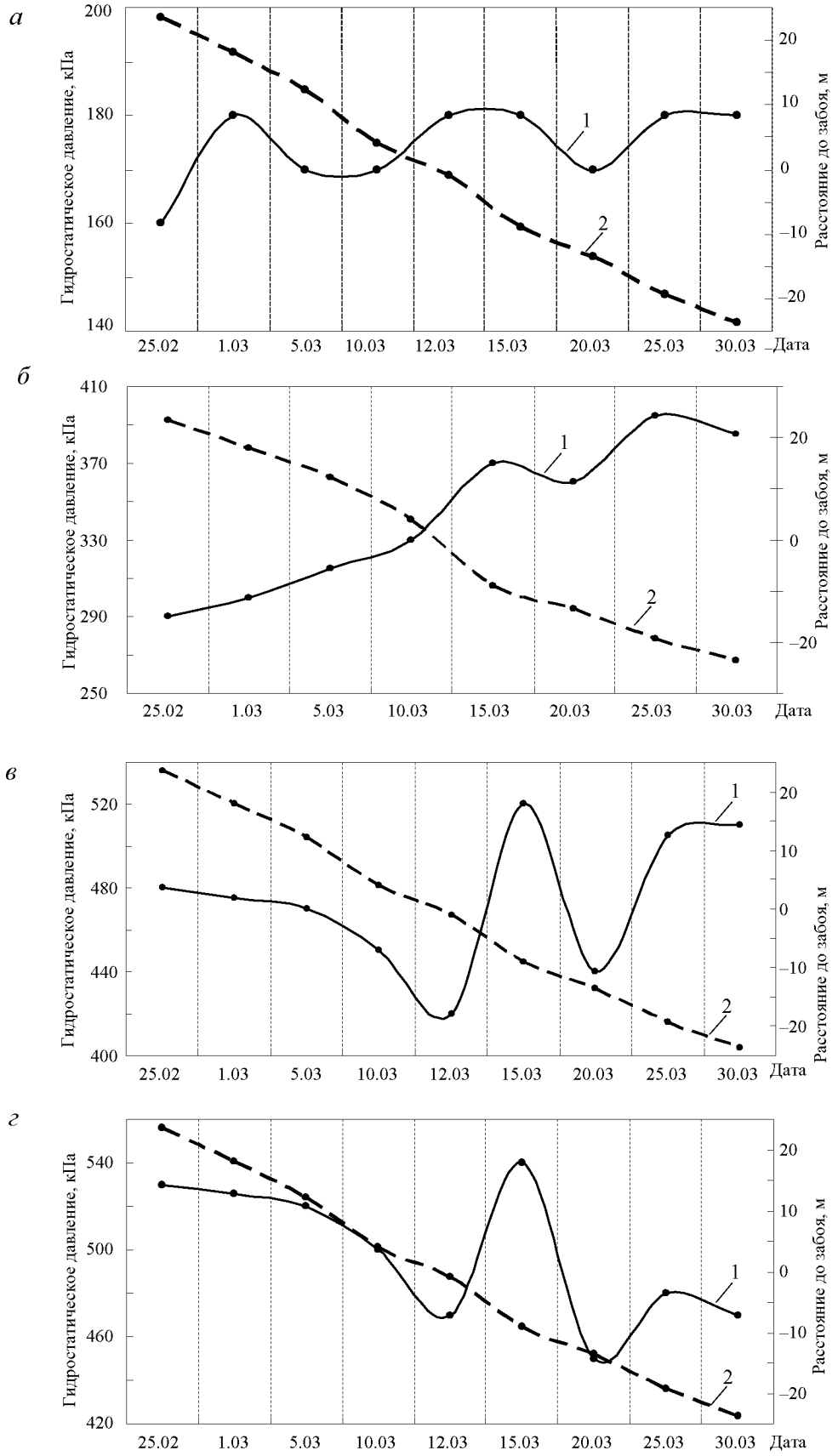



Рис.3. Хронологические графики изменений гидростатических давлений (1) в зависимости от положения забоя тоннеля относительно станции ПДС4 (2) по датчикам, установленным на глубинах 18 (*а*); 31 (*б*); 50 (*в*); 57 м (*г*)

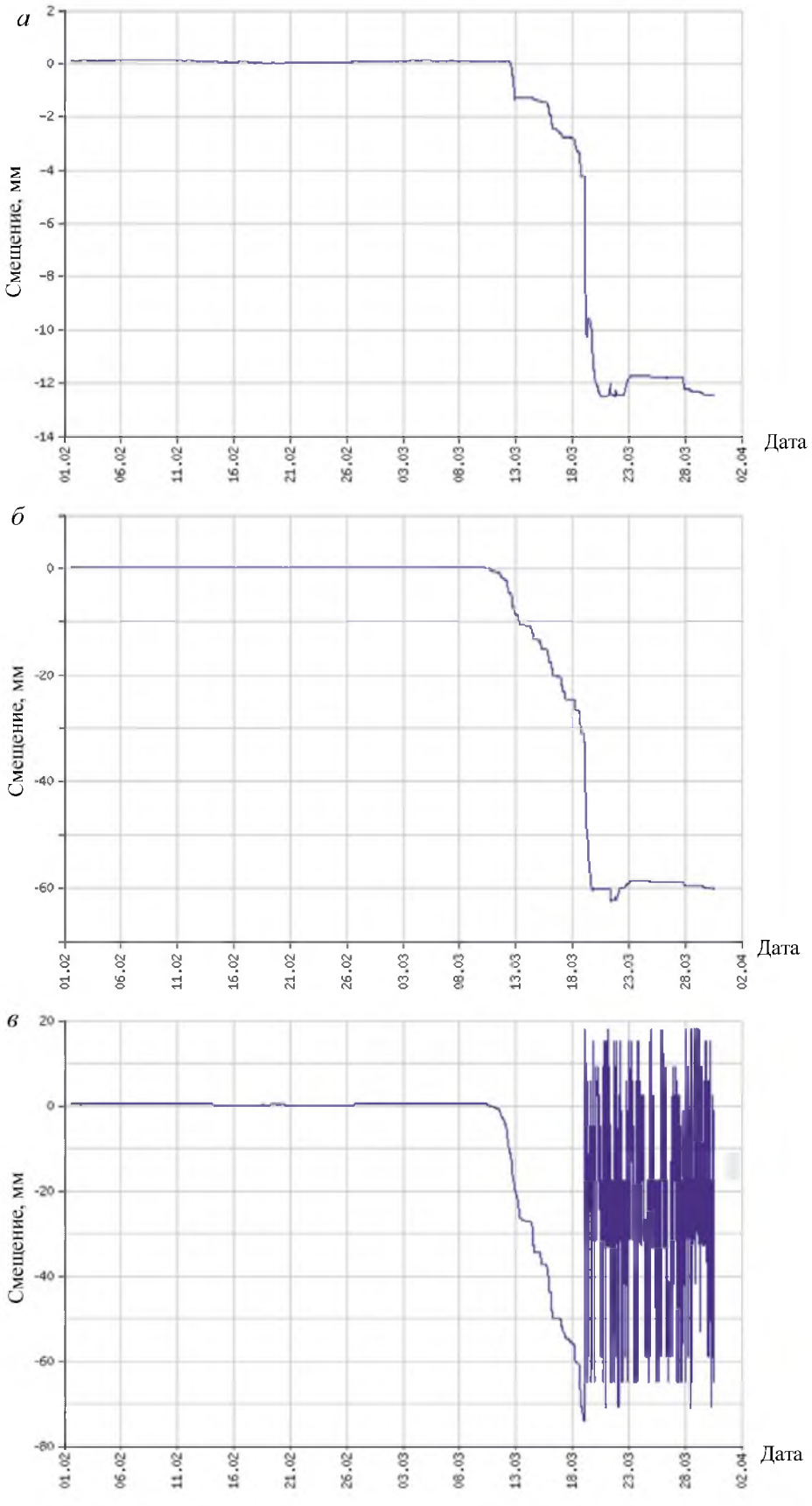



Рис.4. Графики смещения глубинных реперов, установленных на глубинах 18 (*а*); 29 (*б*); 38 м (*в*)

• зона повышенной проницаемости над сводом тоннеля совместно с полостью между грудью забоя и режущим органом проходческого комплекса может рассматриваться в качестве единого гидродинамического элемента, который во всех точках характеризуется практически одинаковыми гидростатическими давлениями, создаваемыми при гидропригрузе забоя или при нагнетании тампонажного раствора за обделку тоннеля;

• гидростатические напоры, создаваемые в зоне повышенной проницаемости над сводом тоннеля, существенно превышают напоры в нижней части забоя тоннеля (при одинаковых гидростатических давлениях в этих частях природно-техногенной структуры);

• в рассматриваемых условиях при фактических давлениях на забое около 0,2 МПа при постепенном подходе к станции ПДС4 эффект гидропригруза проявляется не в полной мере, о чем свидетельствует снижение гидростатических давлений по датчикам, установленным на глубинах 50 и 57 м от земной поверхности (см рис.3);

• при проходе забоя тоннеля непосредственно к станции ПДС4 по датчику, установленному на глубине 31 м, зафиксировано максимальное повышение гидростатических давлений, обусловленное нагнетанием тампонажного раствора за обделку тоннеля, которое сопровождается существенным повышением давлений в зоне техногенной нарушенности подработанного массива.

При повышении гидростатических давлений в зоне техногенной нарушенности подработанного массива возможно разуплотнение пород глинистого состава; суммарная деформация этих пород может быть оценена по зависимости

$$\Delta m = \frac{m\Delta\sigma_э a_п}{1+\varepsilon},$$

где $m$ – мощность зоны повышенной трещиноватости, $m = 20$ м; $\Delta\sigma_э$ – снижение эффективных напряжений, эквивалентное повышению гидростатических давлений над «естественными» при нагнетании тампонажного раствора за обделку тоннеля, $\Delta\sigma_э = 0{,}2$ МПа; $a_п$ – коэффициент разуплотнения пород глинистого состава, определенный по компрессионным испытаниям при нагрузках, соответствующих интервалу изменений эффективных напряжений, $a_п = 5\cdot10^{-2}$ МПа$^{-1}$; $\varepsilon$ – коэффициент пористости моренных отложений глинистого состава, $\varepsilon = 0{,}6$.

При принятых характеристиках суммарная деформация разуплотнения пород в пределах зоны техногенной нарушенности массива может составить порядка 100 мм. Замеренные суммарные деформации расслоения подработанного массива превышают 100 мм. Замеренные оседания фундаментов зданий при проходке тоннеля достигают 15-20 мм. Сопоставление этих оценок позволяет сделать важный практический вывод о том, что повышение гидростатических давлений в подработанном массиве приводит к разуплотнению пород, которое сопровождается сокращением раскрытости техногенных трещин и способствует ограничению оседаний земной поверхности в период проходки тоннеля.

Аналогичные гидрогеомеханические процессы развиваются в техногенно нарушенных массивах блочной структуры при затоплении угольных шахт, в процессе которого деформации разуплотнения пород компенсируются сокращением раскрытости трещин, что ограничивает деформации подъема земной поверхности[*].

Вместе с тем, после проходки тоннеля происходит снижение гидростатических давлений во вмещающем тоннель породном массиве. В рассматриваемых условиях снижение гидростатических давлений до значений, соответствующих естественному гидродинамическому режиму, наблюдалось в течение 4-5 мес. Снижение гидростатических давлений в подработанном массиве сопровождается повышением эффективных напряжений, развитием длительных компрессионных деформаций ранее разуплотненных пород и соответствующим дополнительным оседанием земной поверхности. В рассматриваемых условиях деформации компрессионного уплотнения породного массива невозможно фиксировать по экстензометрам, однако возможные деформации земной поверхности необходимо контролировать в течение длительного периода после проходки тоннеля.

---

[*] *Норватов Ю.А.* Гидрогеомеханические процессы при затоплении угольных шахт / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова // Записки Горного института. СПб, 2010. Т.185.

*Norvatov Ju.A.* Hydrogeomechanical processes in flooding of mines / Ju.A.Norvatov, I.B.Petrova // Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2010. Vol.185.