

УДК 624.138.1

О.А. МАКОВЕЦКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук; С.С. ЗУЕВ<sup>2</sup>, зам. ген. директора (s.zuev@inbox.ru),  
И.И. ХУСАИНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614019, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29)

<sup>2</sup> ОАО «Нью Граунд» (614081, Россия, Пермь, ул. Кронштадтская, 35)

## Обоснование применения искусственного основания — «структурный геомассив»

Приводится пример использования струйной цементации грунта для обеспечения стабилизации неравномерных осадок высотного здания на основании, сложенном слабыми грунтами. Проведена оценка инженерно-геологических условий площадки строительства и обоснована необходимость применения искусственно улучшенного основания «структурный геомассив». Описаны принципы моделирования, конструирования и выполнения на строительной площадке жестких грунтобетонных элементов. Анализ результатов геодезических наблюдений за развитием осадок показал обоснованность предлагаемого конструктивного решения.

**Ключевые слова:** струйная цементация, структурный геомассив, компьютерное моделирование, подземное строительство, осадка, грунты, грунтобетонные элементы.

O.A. MAKOVETSKY<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering); S.S. ZUEV<sup>2</sup>, Deputy General Director (s.zuev@inbox.ru),  
I.I. KHUSAINOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering)

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Avenue, 614019, Perm, Russian Federation)

<sup>2</sup> OAO "New Ground" (35, Kronshtadskaya Street, 614081, Perm, Russian Federation)

### Substantiation of the Use of an Artificial Base — «Structural Block»

An example of the use of jet grouting for ensuring the stabilization of differential settlements of a high-rise buildings on the weak soils base is presented. The evaluation of engineering-geological conditions of the construction site is made; the need for using the artificially improved base "structural geo-massive" is substantiated. Principles of simulation, designing and execution of rigid soil-concrete elements at the construction site are described. The analysis of results of the geodetic monitoring of settlements development shows the substantiation of the structural solution proposed.

**Keywords:** jet grouting, structural massive, computer simulation, underground construction, settlement, soils, soil-concrete elements.

При строительстве высотных зданий основной задачей проектирования подземных частей является обеспечение развития в допустимых пределах осадок и кренов. В сложных инженерно-геологических условиях это бывает практически невозможно осуществить без проведения дополнительных мероприятий по устройству искусственно улучшенных оснований [1, 2].

В [3] приведены результаты проведенного геотехнического мониторинга 20-этажного жилого здания. Конструк-

тивная схема каркасная, сборно-монолитная, возводимая по системе «Куб 2.5» (рис. 1). Фундамент — монолитная железобетонная плита толщиной 0,9 м, абсолютная отметка подошвы — 153,7 м.

В геоморфологическом отношении площадка расположена в пределах IV левобережной надпойменной террасы р. Камы, осложненной долиной реки Данилиха. Южная часть проектируемого сооружения располагается в пределах долины реки Данилиха, что подтверждается перепадом

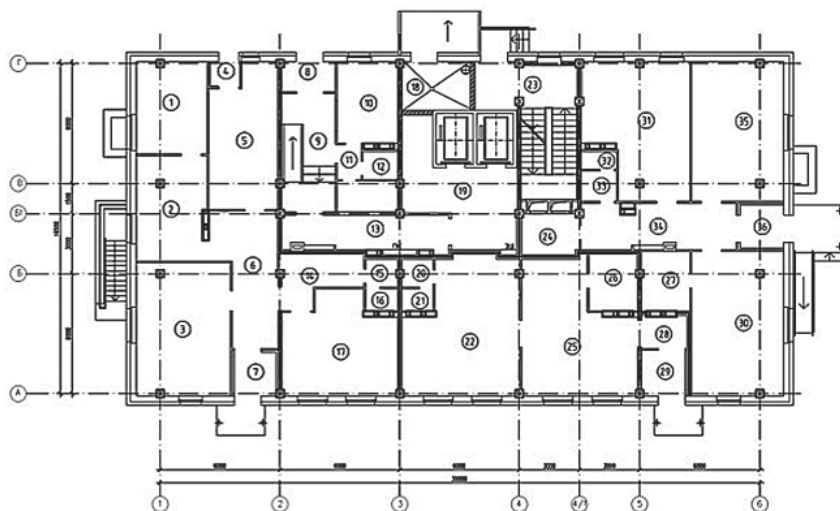


Рис. 1. План и общий вид строящегося здания

высот кровли коренных отложений. Центральная и северная части – к IV террасе р. Камы.

В геологическом строении площадки принимают участие аллювиально-делювиальные отложения четвертичной системы, перекрытые с поверхности насыпными грунтами. В подошве четвертичных отложений залегают коренные грунты пермской системы, которые имеют резкое падение кровли в юго-западном направлении (от оси здания 6 к оси 1) (рис. 2).

Аллювиально-делювиальные четвертичные отложения (adQIII) мощностью от 6,8 м (по оси 6) до 16,1 м (по оси 1). Суглинки в юго-западной части площадки (вдоль оси 1) классифицированы как тугопластичные, редко полутвердые, в интервале отметок: 154,08–149,91 м (непосредственно в основании фундамента) – текуче- и мягкопластичные мощностью 2,8 м; в интервале 146,88–144,98 м – мягкопластичные мощностью 1,9 м. Модуль общих деформаций находится в диапазоне 4–7 МПа.

Пермские отложения (P1sh) вскрытой мощностью до 4 м представлены аргиллитами сильновыветрелыми, сильно трещиноватыми, местами выветрелыми до состояния щебня и суглинка полутвердого. Отметки кровли в северо-восточной части площадки (у оси 6) 146,35–148,05 м, на юго-западе (у оси 1) 138,51 м. Местами встречены прослои песчаники очень низкой прочности с прослоями аргиллита вскрытой мощностью 1,5 м. Модуль общих деформаций находится в диапазоне 10–20 МПа.

Подземные воды встречены в кровле пермских отложений. В периоды снеготаяния и затяжных дождей на границе насыпных и аллювиально-делювиальных грунтов возможно образование горизонта грунтовых вод типа «верховодка».

Здание испытало неравномерные деформации с общей тенденцией развития крена и увеличения осадок здания вдоль цифровых осей в сторону оси А и вдоль буквенных осей в сторону оси 1. Абсолютная осадка на период наблюдений составляла 80–250 мм при допустимой величине 100 мм, относительная разность осадок 0,0026–0,0044 при допустимой величине 0,002. В конструкциях здания появились силовые трещины.

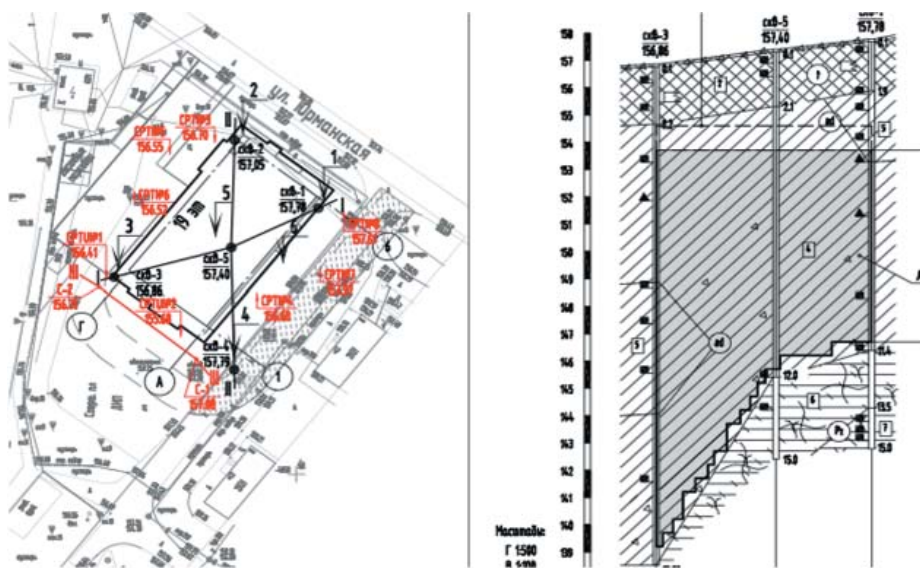


Рис. 2. Инженерно-геологические условия площадки

По результатам численного моделирования установлено, что при нагружении фундамента без выполнения дополнительных мероприятий осадка здания может достигнуть величины 425 мм. Для дальнейшего безопасного строительства и эксплуатации здания было рекомендовано устройство под фундаментной плитой здания на всю мощность аллювиально-делювиальных отложений геомассива улучшенного основания с применением технологии струйной цементации грунтов. Модуль деформации геомассива должен быть не менее 30 МПа. При данном варианте усиления основания прогнозируемая дополнительная осадка здания составит 53 мм.

### Проектирование и устройство основания «структурный геомассив»

Для обеспечения выполнения проектных параметров по осадкам и кренам фундаментов было предложено устройство в основании фундаментов разреженного горизонтального геотехнического барьера в виде «структурного геомассива» [4], слоя грунта, армированного жесткими грунтобетонными элементами, выполненными по технологии струйной цементации грунта. Для обеспечения эффективного модуля общих деформаций «структурного геомассива» 30 МПа было подобрано вертикальное армирование основания грунтобетонными элементами диаметром 600 мм. Диаметр элементов определен грунтовыми условиями площадки и технологическими параметрами процесса цементации грунта. Требуемый эффективный модуль деформации основания здания обеспечивается расстановкой армирующих элементов в плане по сетке с шагом 1,5×1,5 м (рис. 3).

Работы выполнялись в подвале существующего здания, через пробуренные в фундаментной плите технологические отверстия.

После выполнения «структурного геомассива» был выполнен полевой контроль качества выполненных армирующих элементов. Выполненные армирующие элементы имеют диаметр 0,6–0,65 м; прочность грунтобетона на сжатие  $R_c=3\text{--}3,5$  МПа; модуль общих деформаций  $E_{\sigma}=300\text{--}350$  МПа, что в целом согласуется с данными ряда авторов по использованию технологии jet-grouting в сходных геологических условиях [5–7].

Последовательность выполнения работ по устройству «структурного геомассива» была определена в ходе компьютерного моделирования поведения системы основание – здание с учетом образования зон ослабления и повышения жесткости относительно грунта естественного сложения. Работы выполнялись по всей ширине здания по отсекам в следующей последовательности осей: 2–3; 1–2; 5–6; 4–5; 3–4. Во время производства работ велся ежедневный геодезический мониторинг за вертикальными перемещени-



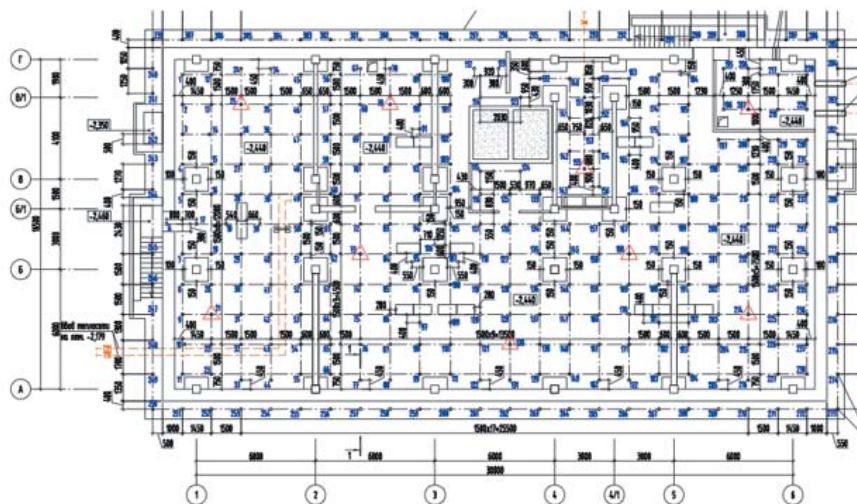


Рис. 3. Схема расстановки армирующих элементов

ями шести контрольных марок, закрепленных на внешней поверхности цокольной части здания.

### Анализ эффективности применения основания «структурный геомассив»

Оценим развитие геотехнической ситуации на примере данного здания, анализируя данные геодезического мониторинга осадок (рис. 4).

В период начального мониторинга поведения здания было установлено, что при достижении 80% от расчет-

ного давления под подошвой фундаментной плиты начали развиваться прогрессирующие осадки основания. Такой характер развития осадок может быть связан с развитием процесса ползучести в слое текучепластичных суглинков. Постоянная скорость развития осадок в этот период (18–20 мм/неделю) говорит об установившейся ползучести. При этом скорости нарастания осадок пропорциональны мощности слабых грунтов, максимальные скорости были достигнуты у оси 1. При развитии крена здания происходит перераспределение давления под фундаментной плитой с увеличением их в зоне максимальных осадок, и без внешних воздействий ползучесть может стать прогрессирующей.

Период производства работ по устройству «структурного геомассива» можно разделить на три характерных этапа (рис. 5). Выполнение грунтобетонных армирующих элементов в начальный момент времени резко снизило скорость нарастания осадок (4,5–5 мм/неделю) за счет «опрессовки» цементным раствором зоны контакта фундаментной плиты с грунтом. Затем по мере развития зон ослабления в основании при устройстве грунтобетонных элементов (нулевая прочность которых в течение 14 ч первичной кристаллизации приводит к развитию технологических осадок) скорость развития осадок снова возросла до

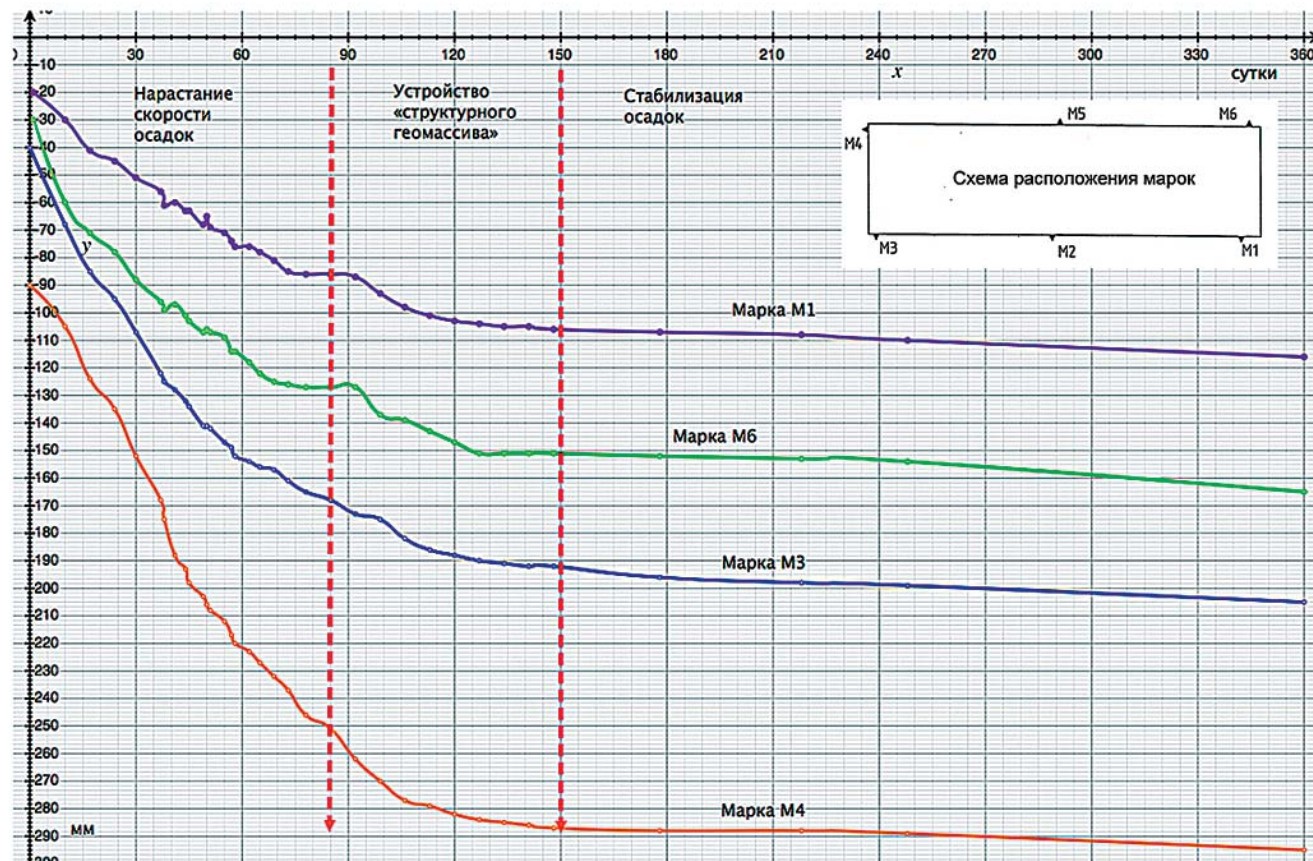


Рис. 4. Графики результатов наблюдений за развитием осадок здания

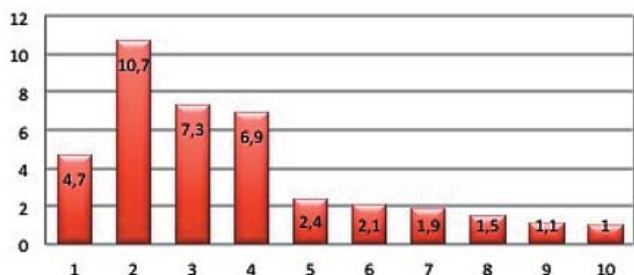


Рис. 5. Диаграмма изменения скорости развития осадок (мм/неделю) в процессе устройства основания «структурный геомассив»

10–11 мм/неделю. По мере набора прочности материалом армирующих элементов (14–28 сут) скорость развития осадок постепенно снижалась (7,3–6,9 мм/неделю). Затем при достижении грунтобетоном проектной прочности и формировании жесткой сетки внутреннего армирования основания она резко упала (2–2,4 мм/неделю), что говорит о прекращении развития процесса ползучести и стабилизации осадок. Геодезические наблюдения за развитием осадок после окончания работ по устройству «структурного геомассива» и в процессе дальнейшего строительства здания (200 дней) показали необратимость этого процесса; величина дополнительной осадки после стабилизации процесса ползучести слабого грунта составила 15–20 мм и находится в расчетных пределах.

#### Список литературы

- Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2012. № 2. С. 17–20.
- Джантемиров Х.А., Долов А.А. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной технологии // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2006. № 1. С. 16–19.
- Пономарев А.Б. Геотехнический мониторинг жилого дома // *Жилищное строительство*. 2015. № 9. С. 41–46.
- Маковецкий О.А., Зуев С.С. Обеспечение эксплуатационной надежности подземной части комплексов жилых зданий // *Жилищное строительство*. 2012. № 9. С. 38–41.
- Богов С.Г. Закрепление грунта по струйной технологии для реконструкции зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 9. С. 51–55.
- Мангушев Р.А., Гутковский В.Э., Конюшков В.В. Определение прочностных характеристик грунтоцементного массива, выполненного по технологии jet-grouting в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 2. С. 69–77.
- Черняков А.В. Оценка долговечности грунтобетона в струйной технологии // *Строительные материалы*. 2011. № 10. С. 37–39.
- Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 301 с.
- Маковецкий О.А., Зуев С.С., Хусаинов И.И., Тимофеев М.А. Обеспечение геотехнической безопасности строящегося здания // *Жилищное строительство*. 2014. № 9. С. 34–38.

Модель поведения улучшенного основания при устройстве его в основании фундаментной плиты под нагрузкой можно описать следующим образом: «структурный геомассив» представим в виде идеальной сплошной среды, деформации которой линейны относительно внешних сил, если только внутренние напряжения не превышают предельных значений. Вместе с тем в сплошном теле равномерно рассеяны по объему неоднородности (грунтобетонные армирующие элементы) и расстояние между ними много больше их собственного размера. Эти неоднородности ответственны за необратимые деформации: на них концентрируются напряжения и происходит их релаксация во времени. Предлагаемая механическая модель «структурного геомассива» позволяет рассматривать классические задачи по определению напряжений и деформаций, возникающих под воздействием внешних сил, но не ограничиваться отысканием равновесных параметров, поскольку после приложения нагрузки в массиве продолжают необратимые деформации и релаксация напряжений на неоднородностях [8].

Экспериментальным подтверждением предлагаемого теоретического подхода являются результаты геодезических наблюдений за осадками высотных зданий, построенных на основании «структурный геомассив» [9], хорошо согласующимися с результатами инженерных расчетов, выполненных с учетом эффективных деформационных характеристик основания.

#### References

- Ilyichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Experience of development of underground space of policies Russian mega. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov*. 2012. No. 2, pp. 17–20. (In Russian).
- Dzhantemirov H.A., Dolev A.A. Experience of strengthening of the basis of a construction by means of jet technology. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov*. 2006. No. 1, pp. 16–19. (In Russian).
- Ponomarev A.B. Geotechnical monitoring of the apartment house. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 9, pp. 41–46. (In Russian).
- Makovetsky O.A., Zuev S.S. Ensuring operational reliability of underground part of complexes of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 9, pp. 38–41. (In Russian).
- Bogov S.G. Fixing of soil on jet technology for reconstruction of buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 9, pp. 51–55. (In Russian).
- Mangushev R.A., Gutovsky V.E., Konyushkov V.V. Determination of strength characteristics of the groutcement massif executed on the jet-grouting technology in engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010. No. 2, pp. 69–77. (In Russian).
- Chernyakov A.V. An assessment of durability of a groutbeton in jet technology. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. 2011. No. 10, pp. 37–39. (In Russian).
- Rodionov V.N., Sizov I.A., Tsvetkov V.M. Fundamentals of geomechanics. Moscow: Nedra, 1986. 301 p. (In Russian).
- Makovetsky O.A., Zuev S.S., Khusainov I.I., Timofeev M.A. Ensuring geotechnical safety of the building under construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 9, pp. 34–38. (In Russian).