

# **СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ**

**УДК 625.7.06.004.67**

**В. А. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф., **Л. А. ИВАНОВА**, доц. (Сибирский федеральный университет, Институт архитектуры и строительства, г. Красноярск)

## **КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Приводятся результаты исследований по взаимодействию техногенных отходов промышленности, в частности золы-уноса и шлама (угольный футеровки), в составе композиции для ремонта дорожных покрытий.

Рассмотрено влияние шлама на структурообразование и оптимальную дозировку в составе композиции, а также приводятся данные рентгенофазового и дифференциально-термического анализов, выводы по результатам исследований.

Дорожные покрытия эксплуатируются в жестких климатических условиях при большой динамической нагрузке, что приводит к их повреждению и постепенному разрушению. Поиск материалов и разработка композиций со специальными свойствами для ремонта дорожных покрытий является актуальной задачей. Потенциальным сырьем для получения ремонтных композиций с высокими эксплуатационными свойствами могут служить многотоннажные экологически безвредные отходы теплоэнергетики и металлургии, которые распространены во многих регионах России.

В данной статье предложены композиции для ремонта дорожных покрытий на основе использования зол от сжигания бурых углей и шлама алюминиевых заводов, представляющие собой модифицированную тонкомолотую угольную футеровку электролизных ванн.

Основным компонентом в ремонтной композиции принимаются смешанные вяжущие, содержащие в своем составе смесь портландцемента и гидравлически активную золу-унос, в качестве заполнителя использовали кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр} = 1,68$  с содержанием глинистых частиц менее 0,1% и multifunctional добавки, повышающие деформативные свойства композиции.

Исследования проводились на основе шлама Красноярского алюминиевого завода и высококальциевой золы Красноярской ТЭЦ-2, образующейся в процессе сжигания бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна, в составе которой присутствует 7–9% свободного оксида кальция [1, 2]. Применение золы от сжигания бурых углей для производства строительных материалов и композиций без дополнительных технологических операций затруднено из-за негативного влияния оксида кальция, находящегося в свободной форме, на структурообразование и прочность затвердевшего материала. Нейтрализовать отрицательное влияние  $CaO_{своб}$  возможно термическими, физическими или химическими способами. В данной работе выбран химический способ нейтрализации свободного оксида кальция за счет применения активных добавок, способных вступать в реакции присоединения и обмена с минералами и химическими элементами золы.

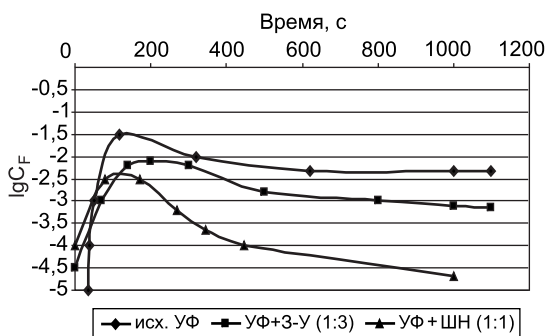
Для совершенствования структуры состава в ремонтную композицию вводились multifunctional добавки, в том числе минеральные, взаимодействующие с продуктами гидратации золы-уноса и портландце-

мента. В качестве минерального наполнителя использовался модифицированный шлам тонкомолотой угольной футеровки, обработанный в стехиометрическом соотношении гипсосодержащим шламом гидролизных производств. Угольная футеровка является попутным продуктом производства алюминия [3]. При производстве алюминия общее количество твердых отходов составляет до 85 кг/т металла, из них до 40 кг/т — лом угольной футеровки электролизеров. Крупные куски футеровки используются на предприятиях черной металлургии взамен плавикового шпата. Мелкие по размерам (< 1,25 мм) фракции угольной футеровки содержат повышенное количество боя — остатков спекшихся глинозема и шамотного кирпича (>10% по массе), не утилизируются и поступают в отвалы-накопители и составляют значительную величину.

Переработка и утилизация твердого отхода (отработанной угольной футеровки) является одним из научных направлений в решении проблемы экологической безопасности и экономической эффективности.

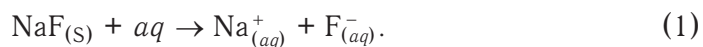
Согласно данным химического анализа по ГОСТу 5382-73 в угольной футеровке содержится до 12,6 мас.% F; 18,8% — Na; 21,2% — Al; 1,82% — Ca; 0,92% — Mg; 1,89% — Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8,61% — SiO<sub>2</sub>; потеря массы после прокаливания более 30%.

Для оценки возможности применения угольной футеровки в ремонтных композициях изучалась полнота связывания фторид-ионов с золой-уносом ТЭЦ-2, содержащей 8,4 мас.% свободного оксида кальция, и неорганическим шламом нейтрализации гидролизного производства, содержащего CaSO<sub>4</sub> до 75 мас.%. Количество добавки в каждом случае было достаточным для стехиометрически обоснованного связывания ионами кальция высвобождающихся ионов фтора (рисунк).



Влияние шлама нейтрализации и золы-уноса ТЭЦ-2 на выщелачивание фтора из угольной футеровки при различных соотношениях угольной футеровки и добавки

Установлено, что при контакте тонкомолотой угольной футеровки с водой происходит активное выщелачивание фтора. Эта стадия взаимодействия, вероятно, обусловлена растворением фторида натрия, находящегося на поверхности измельченных частиц угольной футеровки и протекает по схеме



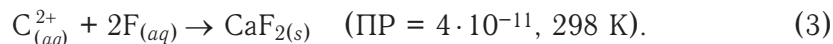
Экспериментальная зависимость логарифма равновесной концентрации фторид ионов ( $\lg C_F$ ) в растворе от времени выщелачивания ( $t$ , с) в пределах ошибок является прямолинейной, т.е. скорость реакции выщелачивания фтора ( $Y_p$ ) на данной стадии практически не изменяется со временем при температуре 22°C

$$Y_p = \Delta C_F / \Delta t \quad 2 \cdot 10^{-4} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (2)$$

Данное значение скорости соответствует быстрому переходу фтора в раствор в течение 1–2 мин, затем скорость процесса выщелачивания заметно снижается. Исследования показали, что при увлажнении тонкомолотой угольной футеровки гипсосодержащим шламом полностью исключается вымывание фтора в окружающую среду. Находящийся в составе ремонтной композиции оксид кальция золы-уноса как основного компо-

нента вяжущего также будет связывать фторид-ионы, высвобождающиеся при гидролизе солей NaF, AlF<sub>3</sub>, Na<sub>3</sub>[AlF<sub>4</sub>] угольной футеровки.

В процессе удаления фтора кальцийсодержащими веществами фторид-ионы, находящиеся в составе простых солей, связываются в малорастворимый осадок:



Концентрация фтора падает в  $2,5 \cdot 10^3$  и  $3 \cdot 10^2$  раз, соответственно при сравнении вымывания из NaF и AlF<sub>3</sub> не превышает 1,5 мг/л — концентрации ПДК по фтору для водоемов и почв [4]. Это свидетельствует о том, что с экологической точки зрения такие ремонтные композиции являются абсолютно безопасными для окружающей среды.

Учитывая экологическую безопасность применения техногенного отхода алюминиевого производства для ремонта дорожных покрытий, исследовано влияние шлама на структурообразование и оптимальную дозировку в ремонтной композиции.

Таблица 1  
**Влияние расхода шлама на нормальную плотность и сроки схватывания ремонтных композиций**

| № состава | Содержание, мас. % |        |      | Нормальная плотность, % | Сроки схватывания, ч |       |
|-----------|--------------------|--------|------|-------------------------|----------------------|-------|
|           | Зола               | Цемент | Шлам |                         | Начало               | Конец |
| 1         | 90                 | 10     | —    | 25,5                    | 01.01                | 01.43 |
| 2         | 90                 | 10     | 1    | 26,5                    | 00.33                | 01.20 |
| 3         | 90                 | 10     | 2    | 28,3                    | 00.37                | 01.28 |
| 4         | 90                 | 10     | 3    | 28,3                    | 00.24                | 00.58 |
| 5         | 90                 | 10     | 4    | 28,5                    | 00.22                | 00.55 |
| 6         | 90                 | 10     | 5    | 28,5                    | 00.16                | 00.40 |

Установлено, что добавка шлама в количестве 1–5% в композиции (сверх 100% по массе) сокращает сроки схватывания в 2–3 раза, при этом повышает водопотребность в 1,5 раза при сохранении подвижности смеси. Шлам оказывает положительное влияние на прочность образцов как в ранние, так и в более поздние сроки твердения. Положительное влияние шлама на

Таблица 2  
**Влияние состава на прочность образцов ремонтных композиций**

| № состава | Содержание, мас. % |        |       |      | Прочность при сжатии МПа |       |        | Прочность при изгибе МПа |       |        |
|-----------|--------------------|--------|-------|------|--------------------------|-------|--------|--------------------------|-------|--------|
|           | Зола               | Цемент | Песок | Шлам | 1 сут                    | 7 сут | 28 сут | 1 сут                    | 7 сут | 28 сут |
| 1         | 40                 | 10     | 50    |      | 2,42                     | 2,74  | 3,62   | 0,81                     | 0,93  | 1,22   |
| 2         | 40                 | 10     | 50    | 1    | 2,60                     | 3,02  | 3,84   | 0,88                     | 2,08  | 1,41   |
| 3         | 40                 | 10     | 50    | 2    | 2,78                     | 3,30  | 4,16   | 0,94                     | 1,20  | 1,49   |
| 4         | 40                 | 10     | 50    | 3    | 2,96                     | 3,54  | 4,42   | 1,01                     | 1,27  | 1,58   |
| 5         | 40                 | 10     | 50    | 4    | 3,18                     | 3,86  | 4,74   | 1,07                     | 1,39  | 1,70   |
| 6         | 40                 | 10     | 50    | 5    | 3,36                     | 4,16  | 5,04   | 1,14                     | 1,52  | 1,81   |

показатели прочности затвердевших композиций подтверждается данными рентгенофазового и дифференциально-термического анализов. Добавление шлама на рентгенограммах твердеющих систем: контрольной (зола + цемент + вода) и опытной смеси (зола + цемент + шлам + вода) на 3 и 28 суток приводит к образованию несколько меньшего количества гидратной извести. Дифракционные максимумы, соответствующие межплоскостным расстояниям, характерным для Ca(OH)<sub>2</sub> —  $d/n = 0,492$  нм, 0,311 нм, 0,263 нм, 0,193 нм, в контрольном образце интенсивнее. Это обусловлено, вероятно, следующими причинами: во-первых, за счет свя-

звания свободной  $\text{CaO}$  золы-уноса активным кремнеземом и фторид-ионами шлама количество образующейся  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при смачивании и гидратации  $\text{CaO}$  снижается, во-вторых, замедлением в присутствии шлама гидратации основного минерала алита  $\text{C}_3\text{S}$ .

Аналогичная закономерность прослеживается при рассмотрении дериватограмм контрольного и опытного образца, содержащего 5% шлама. При нагревании опытного образца можно четко различить две ступени удаления воды при 135 и 180°C, сопровождающиеся соответствующими эндозффектами.

Эффективность использования золы-уноса и шлама тонкомолотой угольной футеровки в составе ремонтных композиций обусловлена результатами их взаимодействия и возможностью частичного решения экологических проблем, связанных с утилизацией промышленных отходов.

Предлагаемые композиции апробированы при проведении ремонтных работ на автомобильных дорогах в разных районах Красноярского края. С учетом различных климатических условий были выбраны местности с низкими температурами; с повышенной влажностью в период положительных температур; с относительно умеренным температурным и влажностным воздействием и с достаточно сухим климатом и воздействием высоких температур. Регулярные наблюдения за отремонтированными участками дорожных покрытий показывают, что разработанные составы композиций с использованием золы-уноса и шлама угольной футеровки подтвердили их эксплуатационную надежность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко Г. И. Золой углей КАТЭКа в строительных материалах/Г. И. Овчаренко.— Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1991.— 216 с.
2. Киселев А. В. Применение топливных отходов ТЭС КАТЭКа в производстве вяжущих/А. В. Киселев, Е. И. Аллилуева, Т. Я. Гальперина и др.//Цемент.— 1988.— № 11.— 24 с.
3. Алюминиевое производство/Под ред. П. М. Беяева.— М.: Металлургия, 1974.— 342 с.
4. Фтор и фториды. Гигиенические критерии состояния окружающей среды.— М.: Всемирная организация здравоохранения, 1989.— 114 с.

© Шевченко В. А., Иванова Л. А., 2008

Получено 23.11.07

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 624.154 : 624.131.37

**Д. Э. АБРАМЕНКОВ, Э. А. АБРАМЕНКОВ, доктора техн. наук, профессора, А. В. ГРУЗИН, канд. техн. наук (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))**

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УПЛОТНЕНИЯ НА БАЗЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ

Развитие технологий в области оснований и фундаментов видится связанным не только с усовершенствованием индустриальных методов возведения фундаментов, но и с переходом в дальнейшем к бескотлованному строительству, что обеспечит минимизацию расходов строительных материалов, уменьшение затрат труда и времени с определенными гарантиями заданных несущих нагрузок.

Актуальными до сих пор остаются также вопросы разработки математически строгих методов расчета совместной работы фундаментов, надфундаментных строений и сжимаемой толщи грунтов ограниченных размеров (конечной толщины) с полным учетом их деформативных свойств [1]. Совершенствование поиска рациональных форм свайных фундаментов, создание программных комплексов для их расчета и проектирования не утратили своей важности [2] и должны привести к совершенствованию технологических процессов уплотнения грунтовых сред.

Одно из направлений увеличения удельной несущей способности свайных фундаментов — разработка их конструкций с развитой боковой поверхностью, т.е. поперечное сечение основания должно иметь максимально возможную величину отношения периметра поперечного сечения к его площади. В полной мере данным требованиям удовлетворяет свая с поперечным сечением в виде укороченной гипоциклоиды [3]. С помощью разработанной математической модели [4, 5] было исследовано влияние параметров жесткого штампа заданной площади в форме укороченной гипоциклоиды и заданной нагрузки на него на пространственное распределение вертикального сжимающего напряжения в упругом полупространстве. Результаты расчетов представлены в виде сечений полупространства вертикальных сжимающих напряжений (рис. 1).

В основе использованной математической модели лежит решение задачи о действии вертикальной сосредоточенной силы, приложенной к поверхности упругого полупространства, полученное в 1885 г. Ж. Буссинеском. Использование принципа суперпозиции позволило определить значение вертикального сжимающего напряжения в каждой точке упругого полупространства при действии сосредоточенной силы  $P$  на поверхность абсолютно жесткого штампа заданной формы. В качестве исходных данных были приняты: величина нагрузки на штамп  $P$ , абсолютно жесткий штамп (форма в плане — укороченная гипоциклоида) заданной площади  $S$ , плоскость сечения пространства напряжений, ее положение относительно основных плос-

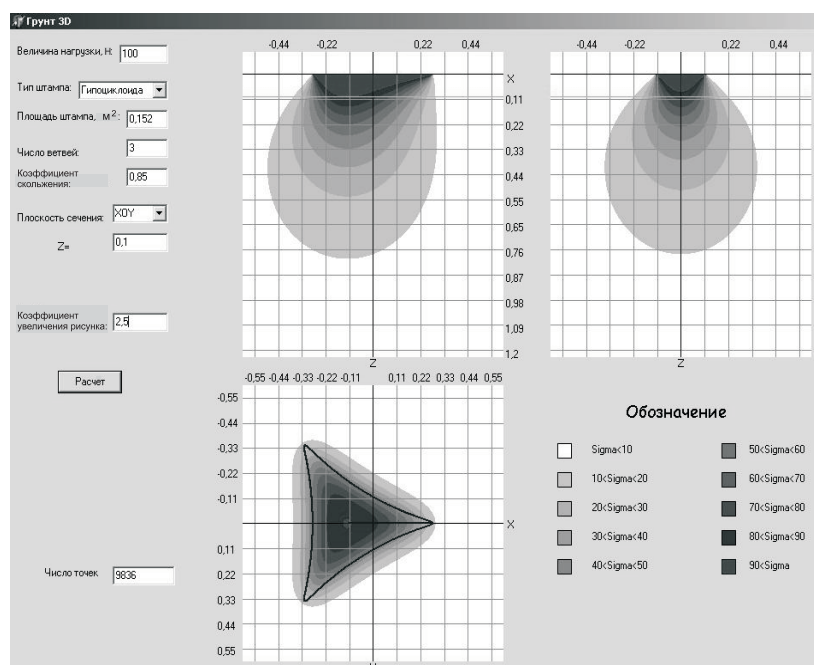


Рис. 1. Результаты расчета распределения вертикального сжимающего напряжения на глубине  $z = 0,1$  м для жесткого штампа в форме трехлучевой укороченной гипоциклоиды с коэффициентом скольжения  $\mu = 0,85$  площадью  $0,152 \text{ м}^2$ . Вертикальная сжимающая нагрузка  $P = 100 \text{ Н}$

костей. В ходе исследований оценивалось влияние коэффициента скольжения и числа ветвей  $N$  укороченной гипоциклоиды на распределение вертикальных сжимающих напряжений  $\sigma_z$  в упругом полупространстве.

Анализ полученных данных позволил установить характер зависимости максимальной глубины  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_z$  от числа ветвей  $N$  (рис. 2) и коэффициента скольжения (рис. 3) укороченной гипоциклоиды.

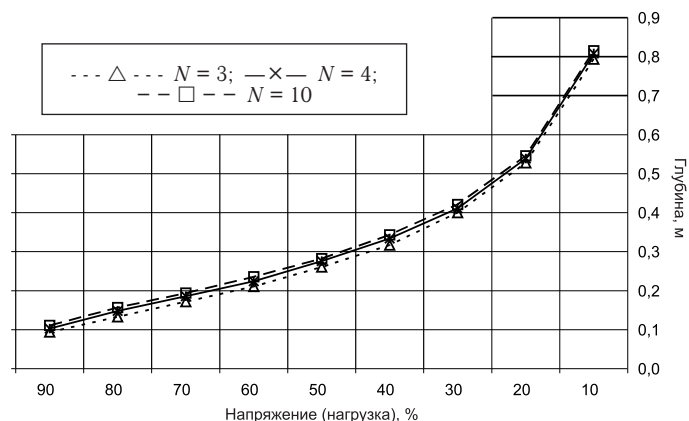


Рис. 2. Зависимость максимальной глубины  $z$  распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_z$  для штампа в форме укороченной гипоциклоиды с различным числом ветвей  $N$  и коэффициентом скольжения  $\mu = 1,0$ , площадью  $S = 0,152 \text{ м}^2$ . Вертикальная сжимающая нагрузка  $P = 100 \text{ Н}$

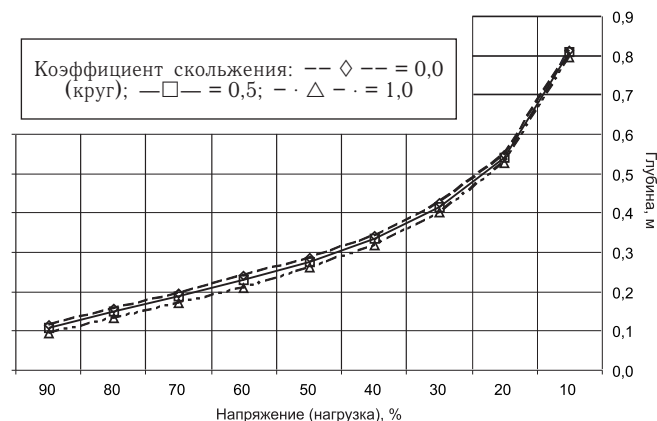


Рис. 3. Зависимость максимальной глубины распределения вертикального сжимающего напряжения для штампа площадью  $S = 0,152 \text{ м}^2$  в форме укороченной гипоциклоиды ( $N = 3$ ) для различных коэффициентов скольжения  $\mu$ . Вертикальная сжимающая нагрузка  $P = 100 \text{ Н}$

Приведенные графики (см. рис. 2, 3) позволяют сделать вывод о незначительном влиянии как числа ветвей укороченной гипоциклоиды  $N$ , так и коэффициента скольжения  $\mu$  на максимальную глубину  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_z$  для жесткого штампа в форме укороченной гипоциклоиды заданной площади  $S$  под действием заданной вертикальной сжимающей нагрузки  $P$ . Как ранее было установлено, практический интерес представляют сечения свай в виде укороченной гипоциклоиды с коэффициентом скольжения  $0,7 \leq \mu \leq 1$  [3]. Поэтому дальнейший анализ зависимости максимальной глубины  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_z$  от параметров укороченной гипоциклоиды ( $N$ ,  $\mu$ ) будем проводить для этих значений коэффициента скольжения ( $0,7 \leq \mu \leq 1$ ).



Сравним максимальную глубину  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_{z_{\max}}$  для штампа в форме правильного  $N$ -угольника и соответствующей ему укороченной гипоциклоиды с  $N$  ветвями и коэффициентом скольжения  $\mu = 1,0$  (рис. 4). Для удобства сравнения результаты представлены в виде относительной ошибки  $\Delta$  (таблица):

$$\Delta = \frac{z_{\text{гип}} - z_{\Delta}}{z_{\Delta}}, \quad (1)$$

где  $z_{\text{гип}}$  — глубина распределения вертикального сжимающего напряжения под штампом в форме укороченной гипоциклоиды ( $N = 3$ ,  $\mu = 1,0$ );  $z_{\Delta}$  — глубина распределения вертикального сжимающего напряжения под штампом в форме правильного треугольника.

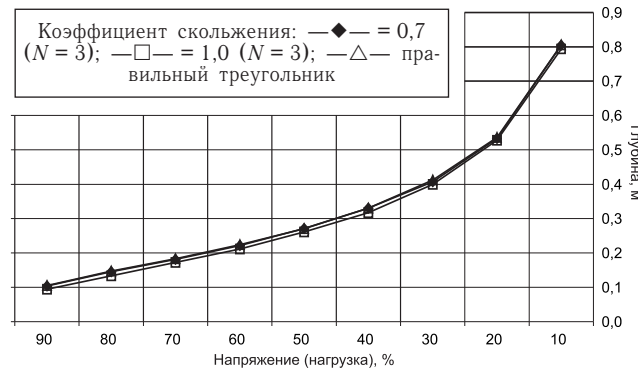


Рис. 4. Зависимость максимальной глубины распределения вертикального сжимающего напряжения  $\sigma_{z_{\max}}$  для штампа площадью  $S = 0,152 \text{ м}^2$  в форме укороченной гипоциклоиды ( $N = 3$ ) для различных коэффициентов скольжения  $\mu$  и в форме правильного треугольника. Вертикальная сжимающая нагрузка  $P = 100 \text{ Н}$

Приведенные графики (см. рис. 4 и таблицу) позволяют сделать вывод о незначительной разнице максимальных глубин  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения для штампа в форме правильного  $N$ -угольника и соответствующей ему укороченной гипоциклоиды с  $N$  ветвями.

**Значения распределения вертикального сжимающего напряжения для штампа в форме правильного  $N$ -угольника и укороченной гипоциклоиды, %**

| Напряжение/<br>Нагрузка | $N = 3$ | $N = 4$ | $N = 5$ | $N = 6$ | $N = 7$ | $N = 8$ | $N = 9$ | $N = 10$ |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 10                      | -1,5    | -0,5    | -0,1    | 0,0     | 0,1     | 0,5     | 0,1     | 0,4      |
| 50                      | -3,3    | -1,8    | -0,4    | -2,1    | 0,0     | -1,7    | 0,0     | -0,7     |
| 90                      | -10,5   | -4,6    | -0,9    | -0,9    | 0,0     | 0,0     | 1,8     | -2,6     |

Таким образом, для определения максимальной глубины  $z_{\max}$  распределения вертикального сжимающего напряжения для штампа в форме укороченной гипоциклоиды с  $N$  ветвями и коэффициентом скольжения с достаточной точностью может быть использована формула [4]

$$z_{\max} = 2,65 \cdot \sqrt{s} \cdot \left[ -0,308 \cdot \ln \left( \frac{\sigma_{z_{\max}}}{10 \cdot p} \right) + 0,78 \right], \quad (2)$$

где  $z_{\max}$  — максимальная глубина распределения вертикального сжимающего напряжения, м;  $S$  — площадь жесткого штампа,  $\text{м}^2$ ;  $\sigma_{z_{\max}}$  — заданное напряжение, Па;  $p = P/s$  — интенсивность нагрузки, Па;  $P$  — сосредоточенная сила, Н.

**Выводы.** 1. Максимальная глубина  $z_{\max}$  вертикальных сжимающих напряжений для постоянных значений действующей силы  $P$  и площади  $S$  жесткого штампа в форме укороченной гипоциклоиды практически не зависит от числа ветвей  $N$  и коэффициента скольжения.

2. Характер зависимости  $z_{\max} = f(s, P)$  одинаков и для жесткого штампа в форме укороченной гипоциклоиды, и для штампа в форме соответствующего правильного  $N$ -угольника.

3. Использование формулы (2) значительно упрощает вычисление максимальной глубины распределения заданного вертикального сжимающего напряжения для жесткого штампа в форме укороченной гипоциклоиды. Отпадает необходимость в использовании специальных методик и таблиц коэффициентов [6]. Относительная ошибка определения  $|z_{\max}| < 11\%$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменков Д. Э. Технология и механизация подготовки оснований и устройств свайных фундаментов / Д. Э. Абраменков, А. В. Грузин, В. В. Грузин и др. — Караганда: Болашак-Баспа, 2002. — 264 с.
2. Грузин А. В. Математическое моделирование в теории грунтов / А. В. Грузин // Междунар. сб. науч. тр. «Актуальные проблемы современности». — Вып. 2. — Караганда: Болашак-Баспа, 2004. — С. 148–152.
3. Грузин В. В. К вопросу о гипоциклоиде / В. В. Грузин, А. В. Грузин // Междунар. сб. науч. тр. «Актуальные проблемы современности». — Вып. 1. — Караганда: Болашак-Баспа, 2004. — С. 172–173.
4. Грузин А. В. Аналитические исследования вертикальных сжимающих напряжений в массиве грунта / А. В. Грузин // Сб. матер. науч.-практ. конф. «Современные проблемы социально-политической и экономической модернизации Казахстана». — Ч. 1. — Караганда: Болашак-Баспа, 2005. — С. 168–170.
5. Грузин А. В. Распределение в грунтовом полупространстве вертикальных сжимающих напряжений / А. В. Грузин // Сб. матер. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Интеграция науки и промышленности — решающий фактор в развитии экономики Республики Казахстан». — Т. 2. — Павлодар: НИЦ ПГУ им. Торайгырова, 2005. — С. 55–59.
6. Механика грунтов, основания и фундаменты / Под ред. С. Б. Ухова. — М.: Высш. шк., 2002. — 566 с.

© Абраменков Д. Э., Абраменков Э. А., Грузин А. В., 2008

Получено 10.03.08

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 725.212(470)

Ю. А. НИКИТИН, канд. архит., проф. (Петербургский государственный университет путей сообщения)

### ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЫСТАВКИ РОССИИ — УРОКИ ИСТОРИИ

Статья посвящена истории отечественных выставок, начиная с Первой публичной выставки Российских мануфактурных изделий 1829 г. в Санкт-Петербурге и по 1917 г. Рассмотрено значение этих смотров для стимулирования развития промышленности, сельского хозяйства, кустарного и ремесленного производства, оживления торговли, а также их роль в общественной и культурной жизни России в XIX — начале XX столетия.

История промышленных выставок в России неразрывно связана с историей ремесленного и мануфактурного производства в нашей стране. Начало



отечественной промышленности было положено еще при Петре I. Однако долгое время мануфактурное производство развивалось довольно медленно, часто существуя благодаря государственным дотациям. Введение в 1822 г. таможенного тарифа на ввозимые товары обеспечило выгоды отечественной промышленности, оградив ее на время от иностранного соперничества. Русские мануфактуры стали быстро расти и уже через несколько лет достигли европейского уровня. Лучшие из отечественных товаров порой смешивались в магазинах с импортными и часто за такие продавались. «Обман сей хотя и служил к чести русского фабриканта, но вредил общему делу: успехи наших фабрик оставались закрыты, и всеобщее предубеждение, укоренившееся веками и поддерживаемое умышленно, не хотело верить, что и у нас уже вырабатываются изделия, не уступающие лучшим иностранным. Надлежало рассеять сие оскорбительное для русских предубеждение, и явить свету успехи наших мануфактур в полном их блеске и величии» [1].

Вот тогда, в 1820-х гг., и возникла потребность организации в России по примеру развитых европейских стран промышленных, или, как они первое время назывались, мануфактурных выставок. Планированием и организацией этих смотров занимался Департамент мануфактур и внутренней торговли Министерства финансов, который путем выставок стремился «ознакомить публику с успехами отечественной промышленности, победить предрассудки, дающие преимущество всему иностранному, и отличиями и наградами за изящнейшие произведения возбудить дух соревнования между фабрикантами и поощрить их к дальнейшему усовершенствованию своих изделий» [2]. Интересно, что уже тогда предполагалось проведение выставок не только отечественных производителей, но и международных экспозиций.

Первая публичная выставка российских мануфактурных изделий состоялась в 1829 г. в Санкт-Петербурге. Она разместилась в «Экспозиционной зале» — специально построенном для этой цели здании на стрелке Васильевского острова [3]. Выставка явилась одним из крупнейших политических, экономических и культурно-просветительных мероприятий первой трети XIX столетия в России.

Вторая Всероссийская мануфактурная выставка состоялась в 1831 г. в Москве. Она разместилась в Доме Благородного собрания (Дом союзов) [4].

Начало массового выставочного движения в провинции положил в 1836 г. «Именной указ об открытии в губернских городах выставок изделий», в котором приводились образцовые правила для подобных смотров [5]. Министерство внутренних дел объявляло господам начальникам губерний высочайшее повеление об учреждении в следующем году выставок местных изделий, где надлежало представить «все, что губерния имеет наиболее замечательного». Эти смотры должны были, по мнению МВД, «распространять на местах сведения о состоянии и усовершенствованиях заводской, мануфактурной, сельской и домашней промышленности, и тем возбуждать и поддерживать между всеми производящими классами похвальное соревнование к улучшению своих производств и изделий» [6]. Проведение губернских выставок в 1837 и 1838 гг. позволило правительству оценить уровень хозяйственного развития регионов. Активная организующая роль правительства в экспозиционной деятельности в провинции показывает, что промышленные выставки стали делом государственной важности.

Организация последующих всероссийских и местных выставок проходит уже со ссылкой на правила 1836 г. Так, в частности, был опубликован «Указ Его Императорского Величества Самодержца Всероссийского об открытии выставки мануфактурных изделий в С.-Петербурге в 1839 году», в котором говорилось, что выставка проводится «на осно-

вании установленных правил, помещенных в Своде законов т. XI, стр. 109–121» [7].

В 1843 г. Министерство государственных имуществ организовало первую опытную сельскохозяйственную выставку в Одессе. В следующем году прошло уже два таких смотра: в селе Великое Ярославской губернии и опять в Одессе. Успех смотров превзошел все ожидания. Началось выделение сельскохозяйственных экспозиций в самостоятельный тип выставок.

В 1845 г. последовало «высочайшее повеление», которым предписывалось:

1. Выставки сельских произведений учреждать в тех местах, где состояние сельского хозяйства того требует.
2. Руководство выставками поручать каждый раз особому временному комитету.
3. К состязанию на выставки допускать все сословия.
4. На издержки каждой выставки ассигновать по 1000 рублей серебром из сумм Министерства государственных имуществ.
5. За представление лучших произведений выдавать по определению комитета выставки медали, денежные премии и похвальные листы [8].

С 1843 по 1849 г. по распоряжению правительства было организовано уже 23 подобных смотра в разных частях Империи. В них приняло участие 5802 экспонента, представившие 14076 предметов; 1918 были поощрены наградами. Большую часть участников на них составляли государственные крестьяне по распоряжению своего местного начальства. Министерство государственных имуществ установило в 1849 г. шесть округов (по 5–6 губерний в каждом) в европейской части России для регулярного проведения сельскохозяйственных выставок [9]. В январе 1849 г. вступил в силу «высочайший указ», по которому на выставки сельских произведений допускались и местные фабричные и ремесленные произведения [10].

В январе 1848 г. утверждено новое положение о промышленных выставках, которое «содействуя и степени настоящего развития промышленности, и потребности времени, заключало в себе единообразные правила для учреждения сего рода, как в столицах Империи, так и в Варшаве» [11]. По новому положению выставки организовывались попеременно в Санкт-Петербурге, Москве и Варшаве через каждые четыре года на пятый. К участию в этих смотрах допускались жители всей Империи, т.е. России, Польши и Финляндии. На основании этих правил IX Всероссийская мануфактурная выставка была проведена в 1849 г. в Санкт-Петербурге, X — в 1853 г. в Москве, XI — в 1857 г. в Варшаве и XII — в 1861 г. снова в Санкт-Петербурге. Новые правила законодательно закрепляли обновленный порядок проведения всероссийских мануфактурных смотров и присуждения наград. Наиболее отличившимся участникам выставок предоставлялось «право употребления государственного герба на вывесках и изделиях».

На проходившей в Москве мануфактурной выставке 1853 г. с разрешения Министерства финансов впервые были введены платные входные билеты [12]. Вырученными деньгами предполагалось хоть как-то компенсировать правительственные затраты на устройство смотра. С этого момента выставки начали приобретать коммерческое значение. В дальнейшем этот аспект будет играть значительную роль в экспозиционном деле, так как вход на большинство выставок стал платным. Надо отметить, что при этом как в столицах, так и в провинции устраивались бесплатные дни или экскурсии для учащейся молодежи, рабочих и крестьян, а на Киевской выставке сельскохозяйственных и фабрично-заводских произведений 1880 г. ее организаторы специально отказались от платных входных билетов, чтобы «не стеснять неимущих классов народа и приезжающих в город крестьян в свободном посещении выставки» [13]. Эта общеобразо-

вательная и демократическая направленность была характерна для выставочной деятельности в России.

Бурное развитие капитализма, начавшееся после реформ 1861 г., повлекло за собой стремительное увеличение количества разных выставок, особенно сельскохозяйственных. Инициатива в этом деле перешла в руки местных научных обществ и земств. Выставки стали устраиваться не только в столицах и губернских городах, но и в уездных городах и селах. Всего с 1843 по 1887 г. было проведено 588 сельскохозяйственных выставок, из них 27 — в губерниях и областях Азиатской России [14]. Правительство отказалось от самостоятельного устройства сельскохозяйственных выставок, но выделяло субсидии для их организаторов. По общему правилу местные сельскохозяйственные выставки объединялись с промышленными смотрами. Выработался распространенный тип местной сельскохозяйственной и кустарно-промышленной выставки.

Огромную роль в развитии выставочного дела сыграли различные научные и деловые общества, в большом количестве возникшие в России в XIX в. Среди них выделялись Вольное экономическое общество, Русское техническое общество, Российское общество садоводства, Московское общество сельского хозяйства и др. В уставах большинства этих обществ имелись положения о выставочной деятельности.

Важной вехой в истории отечественного выставочного дела стала Политехническая выставка в Москве, организованная в 1872 г. Обществом любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете. Она была приурочена к 200-летию со дня рождения Петра Великого — основателя русской промышленности.

Блистательный успех Всероссийской промышленно-художественной выставки 1882 г. в Москве вызвал к жизни ряд крупных областных смотров, ставших значительными событиями в жизни русской провинции. Среди них необходимо назвать первую Прибалтийскую промышленную выставку 1883 г. в Риге, Туркестанскую сельскохозяйственную и кустарно-промышленную выставку 1886 г. в Ташкенте, Сибирско-Уральскую научно-промышленную выставку 1887 г. в Екатеринбурге, Кавказскую выставку предметов сельского хозяйства и промышленности 1889 г. в Тифлисе и т.д. Важным событием стала и Всероссийская сельскохозяйственная выставка 1887 г. в Харькове — первая всероссийская выставка в провинции, организованная не правительством, а Харьковским обществом сельского хозяйства. Каждый такой смотр становился подлинным праздником в жизни губернских городов. Подготовка и проведение выставок подробно освещались в печати — и не только в местной, но и в центральной.

Выставки, а особенно провинциальные, имели громадное общеобразовательное значение, способствовали широкому общению производителей, многостороннему обмену опытом в области производства, промышленному и социальному прогрессу. Например, Кавказское общество сельского хозяйства, подводя итоги выставки 1889 г., сообщало, что она «пробудила в местных промышленниках стремление к усовершенствованию своего производства, вызываемое конкуренцией... и раскрыла с должной полнотою наши богатства, ныне втуне лежащие, и что в то же время она представила населению удобный случай понять все преимущества усовершенствованной техники и ознакомиться со многими орудиями и машинами, которые могли бы найти применение в его хозяйстве» [15].

Значительную роль сыграли выставки в формировании отечественного музейного дела. Экспонаты многих из них послужили основой для создания публичных музеев в столицах и в провинции. Так, Русская этнографическая выставка 1867 г. в Москве послужила основой для коллекции Этнографического музея, Всероссийская мануфактурная выставка 1870 г. в Санкт-Петербурге явилась толчком к созданию Музея

прикладных знаний, Политехническая выставка 1872 г. в Москве оставила после себя Исторический и Политехнический музеи. Из провинциальной практики можно привести пример организации Амурской сельскохозяйственной и промышленной выставки 1907 г. в Благовещенске по инициативе местного научного общества, участники которой должны были указать, «предназначаются ли предметы только для выставки или продажи, или же предназначаются для поступления по окончании выставки в Благовещенский городской музей» [16]. На многих выставках устраивались художественные отделы, положившие начало созданию картинных галерей в губернских городах. Во время работы Сибирско-Уральской научно-промышленной выставки 1887 г. в Екатеринбурге, где имелся художественный отдел, проходила и передвижная выставка Академии художеств. Здесь экспонировались произведения И. К. Айвазовского, А. П. Боголюбова, Б. Н. Виллевалде, П. К. Клодта, В. Г. Перова, Г. И. Семирадского, И. И. Шишкина и других известных русских художников. После закрытия выставки городу были переданы в дар 14 картин и 9 акварелей. Тогда же возникла идея создания в Екатеринбурге школы рисования и лепки [17]. Подобных примеров можно привести еще много.

Массовые общеобразовательные цели вызвали к жизни и такую форму экспозиционной деятельности, как передвижные выставки. Среди них надо назвать Всероссийскую пожарную 1897–1899 гг., кустарную 1903 г., военных трофеев 1916 г. и т.д. В начале XX в. русские предприниматели организовали несколько выставок-продаж на пароходах за границей.

Понимая значительную роль выставок в развитии промышленности и торговли, Министерство финансов ввело в 1891 г. «Временные правила о предоставлении тарифных льгот съездам и выставкам», которые устанавливали бесплатный обратный проезд участникам выставок и провоз экспонатов с них [18]. Эта правительственная мера способствовала активизации выставочной деятельности в России. Надо сказать, что льготы на транспорте предоставлялись участникам отдельных крупных смотров уже начиная с 1869 г. [19].

Крупнейшей выставкой дореволюционной России стала XVI Всероссийская промышленная и художественная выставка 1896 г. в Нижнем Новгороде. Отличительной чертой этой экспозиции от прежних правительственных мероприятий подобного рода была идея проведения ее в провинции. По основным показателям (размер территории, площадь крытых помещений, капиталовложения) Нижегородская выставка превзошла Всемирную парижскую выставку 1889 г. и приблизилась к Всемирной выставке 1876 г. в Филадельфии [20]. Опыт организации некоторых отделов Нижегородского смотра был использован в дальнейшем другими отечественными и международными выставками [21].

В начале XX в. Россия переживала своеобразный выставочный бум, ненадолго прерванный революционными событиями 1905 г. Развитие капитализма повлияло на формирование специализированных промышленных выставок. Местом их проведения становились крупные индустриальные центры России — Санкт-Петербург, Москва, Варшава, Рига, Казань, Одесса, Киев, Харьков и другие города. Наряду с общими промышленно-ремесленными или фабрично-заводскими выставками организовывались и узкоспециализированные экспозиции, например, машин и механизмов, изобретений и усовершенствований, орудий труда и инструментов, электротехнические, автомобильные, воздухоплавательные и т.д.

Процесс урбанизации стимулировал устройство гигиенических, строительных и пожарных выставок. Рост производства предметов домашнего обихода вызвал к жизни различные художественно-промышленные и кус-

тарно-промышленные выставки, сыгравшие свою роль в зарождении отечественного дизайна.

Тенденция к узкой специализации в значительной степени распространилась и на сельскохозяйственную экспозицию. Из общих сельскохозяйственных выставок выделились экспозиции семян и машин, скотоводства, молочного животноводства, коневодства, птицеводства, садоводства, плодоводства и огородничества, пчеловодства и др. Однако наиболее распространенным остался тип местной универсальной выставки — сельскохозяйственной и кустарно-промышленной. Так, в 1910 г. состоялись 633 такие общие и специализированные выставки, которым было выделено правительством в виде пособия свыше 200 тыс. рублей [22].

История выставочного дела в России неразрывно связана с общей историей русского государства и политическими событиями того времени. Этнографическая выставка 1867 г. в Москве была приурочена к Съезду славянских представителей, который должен был «открыть новую эпоху в истории славянского мира». Это обстоятельство вызвало бурю негодования в австрийской печати, называвшей выставку «политической демонстрацией», а Москву — «Меккой панславизма» [23].

Польское национально-освободительное движение 60-х гг. XIX в. не позволило провести очередную XIV Всероссийскую мануфактурную выставку 1869 г. в Варшаве. Она была перенесена на 1870 г. в Санкт-Петербург под «благовидным» предлогом — «ввиду совершающегося, но не приведенного еще к окончанию административного преобразования в Царстве Польском и могущих вследствие сего представиться затруднений к надлежащему устройству в будущем году мануфактурной выставки в Варшаве» [24].

Революционные события 1905–1907 гг. повлияли на тематическую направленность выставок. Выставочное дело достигло такой специализации и совершенства, что превратилось в серьезное средство идеологического воздействия на массы. Характерным примером конкретного социального заказа может служить устроенная в Риге в 1907 г. Выставка жилищ рабочих и народного питания. Она преследовала определенную цель — «указать малообеспеченному классу населения пути, следуя которым он, при данных условиях, был бы в состоянии украсить свое жилище... и научить его, при скромных средствах, дешево и целесообразно питаться» [25].

Одесская фабрично-заводская и промышленно-художественная выставка 1910 г. открыто провозгласила экспансионистские цели русского капитализма — «экономическое завоевание стран Ближнего Востока» [26]. 300-летие дома Романовых, помпезно отмеченное в 1913 г., совпало с целым рядом «верноподданнических» смотров как в столицах, так и в провинции.

Россия была организатором целого ряда международных выставок. Они проводились в основном в Санкт-Петербурге и Москве. Идея проведения международных смотров в России восходит к 1825 г., а первый такой смотр был устроен Российским обществом садоводства в 1869 г. в Санкт-Петербурге в Михайловском манеже, который с тех пор регулярно использовался для различных экспозиций [27]. Преемником современных «Инрыбпромов» стала Международная рыбопромышленная выставка 1902 г. в Санкт-Петербурге. Заметным событием в общественной жизни обеих столиц явились Международные автосалоны 1907, 1908, 1910 и 1913 гг. Одной из крупнейших и значительных по результатам была Международная строительно-художественная выставка, организованная в 1908 г. Обществом гражданских инженеров в Санкт-Петербурге.

Частные экспоненты из-за границы участвовали во многих отечественных выставках как столичных, так и провинциальных. Примером может



служить Сибирско-Уральская научно-промышленная выставка 1887 г. в Екатеринбурге, организованная Уральским обществом любителей естествознания. В ней приняли участие девять иностранных гостей из Англии, Германии, Италии, США, Франции, Швеции. На выставку были командированы официальные представители от правительств Германии, Швеции и Японии. Екатеринбургский смотр посетили специальные корреспонденты английских, американских, итальянских и немецких газет [28]. Все это говорит о значительном интересе к нашим выставкам за рубежом и их международном авторитете.

Говоря об организации различных международных смотров в России, необходимо сказать и об идее проведения у нас всемирной выставки. Вопрос устройства такого смотра в России давно волновал определенные круги русской общественности. В свое время Всероссийскую мануфактурную выставку 1870 г. в Санкт-Петербурге современники называли предвестницей будущей всемирной. В начале 90-х гг. XIX в. Киев проектировал создание у себя постоянной всемирной экспозиции [29].

В 1894 г. в Государственной думе был поднят вопрос о всемирной выставке в Санкт-Петербурге в 1903 г. в связи с 200-летием основания города. Дума одобрила предложение о ее проведении в 1904 г. [30]. Была даже создана подготовительная комиссия. К сожалению, эта идея не была реализована. Такое колоссальное мероприятие, как всемирная выставка, требовало превосходной организации и больших капиталовложений. Однако правительство в это время было занято другим: стараясь сбить нарастающую революционную волну, оно начало дальневосточную кампанию. Поражение России в Русско-японской войне, драматические события первой русской революции были объективными причинами временного затухания выставочной деятельности.

Последним международным смотром стала выставка садоводства 1914 г. в Санкт-Петербурге, устроенная Императорским Российским обществом садоводства. Выставка разместилась в только что выстроенном здании общества и в Таврическом саду.

Август 1914 г. прервал выставочную деятельность в России... Однако уже в 1916 г. Государственный совет утвердил «Положение о порядке устройства выставок и о заведовании ими», проект которого еще в 1912 г. одобрила Государственная дума. Это новое положение должно было упорядочить систему организации выставок, проведение экспертизы на них и назначение наград. Решение всех этих вопросов возлагалось на специальные Выставочные комитеты при Министерстве торговли и промышленности и при Главном управлении земледелия и землеустройства [31].

В 1917 г. планировалось проведение нового всероссийского смотра в Москве. Закон о выставке приняли еще в июне 1914 г. Правительство собиралось выделить для нее 23 млн рублей. Стоимость строительных работ по смете составляла 13 млн рублей. По своим размерам предстоящая экспозиция должна была вдвое превышать Нижегородскую 1896 г. [32]. Этим планам не суждено было сбыться. Первая мировая война, революция и затем Гражданская война на долгие годы прервали хорошо налаженную и разнообразную выставочную деятельность в России.

Общее количество промышленных, сельскохозяйственных и различных специализированных выставок, проведенных в России в XIX — начале XX в., трудно поддается учету. Число это огромно — несколько десятков тысяч. Изучая архивы и фонды библиотек, удалось составить относительно полный список международных, всероссийских, областных и наиболее крупных местных выставок, насчитывающий около 500 единиц.

Всероссийские мануфактурные и промышленно-художественные выставки, организованные правительством, составляют несколько обособленную группу. Они были поистине универсальными по представленной



экспозиции, охватывающей практически все сферы деятельности русской нации. Таких выставок было 16. Шесть из них проведено в Санкт-Петербурге, шесть — в Москве, три — в Варшаве и одна — в Нижнем Новгороде. К этой группе, в сущности, можно отнести Политехническую выставку 1872 г. в Москве и Всероссийскую выставку 1913 г. в Киеве, хотя они и были организованы не правительством, а научными обществами.

В отдельную группу можно выделить всероссийские специализированные выставки: сельскохозяйственные — 1850, 1860, 1864, 1887, 1895 гг., скотоводческие — 1869, 1903, 1910 гг., конские — 1866, 1869, 1891, 1898, 1899, 1910 гг., садоводства и плодоводства — 1890, 1908, 1913 гг., гигиенические — 1893, 1913 гг., кустарные — 1890, 1902, 1907, 1913 гг., ремесленные — 1885, 1914 гг. и т.п. К этой группе относятся более 50 выставок, организованных как правительственными учреждениями, так и различными научными или коммерческими обществами. Как правило, они состояли под «высочайшим» покровительством кого-нибудь из членов царской фамилии.

Областные выставки захватывали близлежащие губернии, отличались серьезной организацией и большим количеством участников (Екатеринбург 1887 г. — 2500 участников, Ташкент 1889 г. — 1300, Тифлис 1889 г. — 2500, Киев 1897 г. — 1700, Одесса 1910 г. — 1400 участников). Эти выставки устраивались чаще всего местными научными обществами. Для их проведения требовалось обязательное разрешение правительства, которое обычно выделяло субсидии из государственной казны.

Огромное количество местных выставок не представляло собой однородной массы и подразделялось на губернские и уездные. Губернские выставки организовывали земства, реже городские управления. Они привлекали довольно много участников (Херсон 1890 г. — 600 участников, Рига 1901 г. — 800 участников). Уездные выставки проводились очень часто, особенно сельскохозяйственные. Они устраивались уездными земствами, страдали плохой организацией и отсутствием квалифицированной экспертизы. Часто такие выставки проводились во время больших городских и сельских ярмарок. Их участниками были в основном крестьяне и кустари.

В отдельную группу надо выделить и международные выставки, организованные на территории России. Они устраивались либо различными научными обществами, либо правительством. Эта группа насчитывает около 50 выставок.

Таким образом, все выставки, организованные в дореволюционной России, можно разделить на четыре группы: международные, всероссийские, областные и местные. Промышленные выставки находились в ведении Министерства торговли и промышленности. Выставки сельскохозяйственные, лесные, животноводческие, рыбопромышленные, охоты, кустарные и земельных улучшений состояли в ведении Главного Управления землеустройства и земледелия. Все выставки подразделялись также на правительственные (организованные вышеназванными министерствами) и частные (устраиваемые различными научными или профессиональными обществами, коммерческими или торгово-промышленными учреждениями, земствами, городскими общественными управлениями и отдельными лицами). Если частные выставки устраивались с соисканием правительственных наград, то для этого обязательно требовалось разрешение соответствующего министерства. Огромное количество различных местных выставок, организуемых без соискания правительственных наград, проводилось с разрешения местных властей.

Право изображения государственного герба на изделиях и товарах являлось высшей выставочной наградой, которая присуждалась только на правительственных выставках. Это был первый знак качества в истории России, который начал применяться с 1829 г.

Значение русских промышленных, сельскохозяйственных и специализированных выставок велико и разнообразно. Они представляли собой наглядную картину состояния различных отраслей промышленности, науки, техники, сельского хозяйства (а в отдельные периоды и изобразительного искусства) отдельного уезда, губернии, области, всей страны в целом за определенные периоды времени. Публичное соревнование производителей и установившаяся система поощрения лучших произведений превращали выставки в арену острой конкурентной борьбы, вынуждавшую постоянно совершенствовать производство. Выставки являлись также лучшим способом внедрения в практику изобретений. Массовое привлечение посетителей и представителей деловых кругов способствовало наглядной рекламе товаров. Выставки стали местом заключения крупных торговых сделок и распродажи отдельных экспонатов после их закрытия. Таким образом, главное и основное значение этих смотров заключалось в стимулировании развития промышленности, сельского хозяйства, кустарного производства, а также нахождения новых рынков сбыта товаров и оживления торговли в целом.

Выставки были одним из способов выяснения статистики, так как каждый участник в анкете-заявке должен был сообщать подробные сведения о своем производстве, например: количество рабочих и машин, сумма оборотного капитала, места получения сырья и сбыта продукции и т.д. Все эти данные поступали в земства и служили исходным материалом для составления статистических данных по всей России. На некоторых выставках устраивались специальные статистические отделы.

Всероссийские и местные выставки имели большое просветительское и общеобразовательное значение. Соединение в одном месте богатства страны или отдельной губернии, ее умственных и производительных сил знакомило широкие массы населения и самих участников с новейшими достижениями всех сфер деятельности русской нации. На этих смотрах было прочитано много лекций, организовано посещение фабрик, заводов, сельскохозяйственных ферм и питомников. Демонстрационные показы, изготовление некоторых видов продукции, научные и деловые съезды производителей прочно вошли в практику организации выставок как все-российских, так и местных.

Большое, до сих пор не оцененное по достоинству влияние оказали отечественные выставки на развитие архитектуры, строительной техники, инженерной мысли, на градостроительное развитие русских городов конца XIX — начала XX в. С выставками связана активная строительная деятельность — создание уникальных выставочных комплексов и появление совершенно нового типа зданий — выставочных павильонов. Поиски нового художественного образа, новаторские инженерные решения, смелые эксперименты в области искусства экспозиции и промышленной рекламы — все это в полной мере было представлено на многочисленных отечественных выставках. Русские зодчие, инженеры и художники создавали оригинальные выставочные здания, сооружения и их комплексы, несмотря на их временный характер.

Выставочная строительная практика в России шла в нескольких направлениях. Ее можно разделить и на несколько периодов. Первый этап связан с возведением монументальной «Экспозиционной залы» в 1829 г. в Санкт-Петербурге и использованием ее вплоть до 1861 г. Второй период связан с размещением выставок в крупных существующих зданиях — манежах, экзерциргаузах и дворцах. Он начался в 1831 г., когда в Моск-

ве стал использоваться Дом Благородного собрания. В Санкт-Петербурге он начался в 1833 г., когда экспозиция III Всероссийской мануфактурной выставки разместилась помимо «Экспозиционной залы» еще и в Южном пакгаузе. Императорское Вольное Экономическое Общество организовало в 1850 г. первую в столице выставку сельских произведений в здании манежа лейб-гвардии Конного полка (ныне Центральный выставочный зал). Начиная уже с этого смотра, мы сталкиваемся с регулярной практикой строительства временных экспозиционных сооружений рядом с приспособляемыми зданиями. Наиболее показательным примером такой практики могут служить грандиозные пристройки 4-й международной автомобильной выставки 1913 г. в Санкт-Петербурге. Кстати, практика размещения экспозиций в крупных существующих зданиях продолжается и сегодня. Конногвардейский манеж в Санкт-Петербурге и Манеж в Москве после реконструкции превращены в выставочные залы.

Строительство временных выставочных павильонов и их комплексов составляет третий и наиболее интересный период. Он начался с Всероссийской мануфактурной выставки 1870 г. в Санкт-Петербурге и закончился Всероссийской ремесленной и фабрично-заводской выставкой 1914 г. в Москве.

Выставочная деятельность Императорского Русского Технического Общества связана со строительством постоянных выставочных зданий для различных экспозиций. Она началась в 1887 г. и закончилась в 1914 г., когда Императорское Русское общество садоводства построило для себя постоянное выставочное здание в Санкт-Петербурге в Таврическом саду. К сожалению, здесь прошла всего одна экспозиция — Международная выставка садоводства 1914 г.

Всероссийская фабрично-заводская, торгово-промышленная, сельскохозяйственная и научно-художественная выставка 1913 г. в Киеве и проектные предложения тех лет знаменуют собой начало новой тенденции — строительство постоянных выставочных комплексов. Этот опыт получил свое широкое развитие уже в послереволюционное время на примере Всесоюзной сельскохозяйственной выставки 1939 г. в Москве, преобразованной в 1959 г. в Выставку достижений народного хозяйства (ВДНХ СССР), и аналогичных комплексов в столицах союзных республик.

Архитектура выставочных павильонов формировалась под воздействием существующего опыта отечественного строительства, а также опыта организации всемирных и международных выставок. В проектировании и строительстве выставочных зданий и их комплексов принимали участие крупнейшие русские архитекторы, инженеры, художники, скульпторы, садоводы-декораторы, создавшие яркие и самобытные произведения. Выставки были местом, где часто происходило экспериментальное строительство с применением новых рациональных конструкций, использовалась прогрессивная технология, всевозможные изобретения и усовершенствования. Эти постройки оказали многостороннее влияние на развитие отечественной архитектуры и строительной техники в целом.

С выставками связано зарождение и развитие искусства экспозиции, которое служит не только целям промышленной рекламы, но и является важным средством эмоционального и идеологического воздействия на широкие массы населения. Поиски новых форм решения экспозиции предвосхитили появление некоторых направлений современного коммерческого искусства, в частности, поп-арта и его архитектурной разновидности.

Строительство павильонов в виде улучшенных или образцовых вариантов различных производственных сооружений совершенствовало эти типы зданий и одновременно вырабатывало специфические черты, прису-

шие именно экспозиционной архитектуре. На выставках иногда возводились и получали путевку в жизнь совершенно новые по назначению типы зданий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Описание первой публичной Выставки Российских мануфактурных изделий, бывшей в С.-Петербурге в 1829 году.— СПб., 1829.— С. 15.
2. Министерство финансов 1802–1902 гг.— СПб., 1902.— С. 342.
3. Никитин Ю. А. Первый выставочный зал России/Ю. А. Никитин// Ленинградская панорама.— 1982.— № 1.— С. 36–38.
4. РГИА, ф. 18, оп. 2, № 636, Дело об организации в Москве выставки русских фабрик.
5. Общий план губернских выставок.— СПб., 1836.
6. Полное Собрание Законов Российской Империи. Т. XI. 1836, Отделение 1. № 9485.— СПб., 1837.— С. 888–891.
7. РГИА, ф. 1341, оп. 39, № 2353, «Дело об открытии выставки мануфактурных изделий в С.-Петербурге в 1839 году».
8. Матвеевский Н. О выставке сельских произведений, учрежденной ИВЭО в С.-Петербурге/Н. Матвеевский.— СПб., 1850.— С. 1.
9. Брокгауз Ф. А. Энциклопедический словарь/Под ред. И. Е. Андреевского.— Т. 1–41 (82 кн.)/Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон.— СПб., 1890–1904.— Т. 7а (кн. 14).— С. 559.
10. Полное Собрание Законов Российской Империи. Собрание 2. Т. XXIV. Отделение 1, 1849, № 22906.— СПб., 1850.— С. 22–23.
11. Полное Собрание Законов Российской Империи. Отделение 1. Т. XXIII, 1848, № 21914.— СПб., 1849.— С. 55–61.
12. РГИА, ф. 18, оп. 2, № 1447.
13. Отчет о выставке сельскохозяйственных и фабрично-заводских произведений, бывшей в Киеве в 1880 году.— Киев, 1880.— С. 90.
14. Брокгауз Ф. А. Энциклопедический словарь/Под ред. И. Е. Андреевского.— Т. 1–41. (82 кн.)/Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон.— СПб., 1890–1904.— Т. VII (кн. 14).— С. 559.
15. Кавказская выставка предметов сельского хозяйства и промышленности. Кавказский календарь на 1889 год.— Тифлис, 1889.— С. 11.
16. Программа Амурской сельскохозяйственной и промышленной с ремесленно-кустарным отделом выставки, устраиваемой Амурским Сельскохозяйственным обществом в г. Благовещенске в 1907 году.— 1906.— С. 3.
17. Корепанова С. А. Сибирско-Уральская научно-промышленная выставка 1887 года. Из истории выставочной деятельности XIX в./С. А. Корепанова// Очерки истории Урала, № 18.— Екатеринбург, 2002.— С. 85.
18. Сборник тарифов Российских железных дорог.— 1891.— № 211.— 20 апр.
19. Отчет о Первой Всероссийской выставке рогатого скота 1869 года в С.-Петербурге.— СПб., 1870.
20. Барановский Г. В. Здания и сооружения на Всероссийской художественно-промышленной выставке 1896 г. в Нижнем Новгороде/Г. В. Барановский.— СПб., 1897.— С. 11.
21. Шапиро А. Участие России во всемирных выставках XIX и начала XX вв./А. Шапиро// Архивное дело.— 1939.— № 1.— С. 101.
22. Брокгауз Ф. А. Новый энциклопедический словарь в 29 т./Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон.— СПб., 1912–16.— Т. 12.— С. 80.
23. Всероссийская этнографическая выставка и Славянский съезд в мае 1867 года.— М., 1867.— С. 99.
24. РГИА, ф. 40, оп. 1, № 20. Л. 60.
25. Выставка жилищ рабочих и народного питания// Вестник Либавы.— 1907.— № 134.
26. «Открытие»// Вестник выставки 1910 года в Одессе.— 1910.— № 14.
27. Никитин Ю. А. Выставочный Петербург/Ю. А. Никитин.— Череповец, 2003.
28. Корепанова С. А. Указанное соч.— С. 109.
29. Ярмонкин В. Постоянная Всемирная выставка в Киеве/В. Ярмонкин.— СПб., 1894.
30. Всемирная выставка в Петербурге// Неделя строителя.— 1894.— № 2.— С. 10; № 10.— С. 31.
31. РГИА, ф. 23, оп. 15, № 18.
32. РГИА, ф. 23, оп. 27, № 154. Л. 26–27.

© Никитин Ю. А., 2008

Получено 12.12.07

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 691.4.001

**В. Г. БЕЗБОРОДОВ**, д-р техн. наук, проф., **Л. Ф. МЕДЕНЦОВ**, канд. техн. наук, проф., **О. Б. БЫКАСОВА**, **Н. Л. МЕДЕНЦОВА**, ст. преподаватели (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

### МЕЖФАЗОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ СУГЛИНОК — СТЕКЛО ПРИ СПЕКАНИИ КЕРАМИКИ

Представлены экспериментальные данные по смачиванию поверхности керамики из суглинка расплавами силикатных стекол. Установлена связь явления смачивания с вязкостью расплава стекол. Стекла, обладающие лучшей смачивающей способностью, обеспечивают более высокую прочность керамического черепка. Данными ИК-спектроскопии подтверждается химический характер межфазового взаимодействия в системе стекло — суглинок при обжиге материала.

Управление процессом спекания ячеистой керамики из глин является сложной технологической задачей, решение которой требует глубокого понимания физико-химической сущности явлений, протекающих при обжиге материала. Поскольку основным требованием, предъявляемым к керамике такого вида, является достижение предельной прочности при сохранении высокой пористости черепка, то особое внимание специалистов должно уделяться адгезионному взаимодействию жидкой фазы с поверхностью твердых частиц. В настоящей работе в экспериментально-теоретическом аспекте рассматривается природа физико-химических явлений, происходящих в контактной зоне между расплавом стекла и поверхностью зерен суглинка при обжиге материала.

Спекание керамики с участием жидкой фазы описывается уравнением Кингери [1]

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{4\sigma \cdot \tau}{9\eta \cdot r},$$

где  $\frac{\Delta V}{V_0}$  — усадка материала;

$\sigma$  — поверхностное натяжение стекловидного расплава, Н/м;

$\eta$  — вязкость расплава, Па·с;

$r$  — средний радиус частицы твердой фазы, м;

$\tau$  — время изотермической выдержки образца, с.

Представленная формула усадки применима при условии полного смачивания расплавом стекла поверхности частиц твердой фазы. Совместное влияние основных факторов ( $\sigma$ ,  $\eta$ ,  $r$ ) обретает физический смысл, если представить уравнение в виде:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = k \cdot \frac{2\sigma \cdot \cos\Theta}{r'} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \tau,$$

где  $k$  — постоянная величина, включающая все постоянные множители;  
 $r'$  — средний размер пор, м ( $r'$  находится в прямой связи с размерами частиц твердой фазы:  $r' = c \cdot r$ );

$\Theta$  — краевой угол смачивания.



Приведенное выражение содержит произведение трех переменных величин:

— капиллярного давления  $\Delta p = \frac{2\sigma \cdot \cos\Theta}{r'}$ ;

— текучести стекловидного расплава  $1/\eta$ ;

— времени выдержки образца при температуре обжига, .

Влияние основных факторов на процесс спекания сводится к следующему.

*Величина капиллярного давления* при выбранной дисперсности порошков сырьевой массы и практической неизменности поверхностного натяжения расплавов силикатных стекол в температурном интервале 700–1200°C ( $\Delta\sigma$  при изменении температуры на 100°C составляет 1–1,5%) зависит только от показателя смачивания — краевого угла  $\Theta$  (рис. 1, а). Возникающее при смачивании искривление поверхности расплава в форме вогнутого мениска ведет к появлению дополнительного отрицательного давления, обусловленного поверхностным натяжением. Силы капиллярного давления, направленные к центру кривизны поверхности, вытягивают жидкость из межзерновых каналов в поры, тем самым оказывая стягивающее действие на частицы твердой фазы (рис. 1, б).

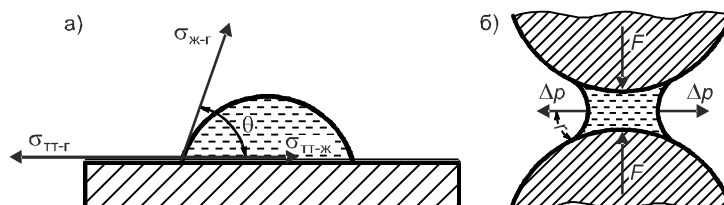


Рис. 1. Схема поверхностных сил, действующих на межфазовой границе керамика–расплав стекла — газ (а); схема стягивающего действия зерен суглинки, обусловленного течением расплава стекла (б)

*Текучесть расплава* определяет скорость его перемещения в межзерновом пространстве и, следовательно, интенсивность процесса массопереноса и растворения материала твердой фазы.

*Время обжига* — технологический фактор, устанавливается опытным путем.

Анализ формулы усадки материала позволяет заключить, что спекание глинистых масс с участием жидкой фазы обусловлено температурно-активируемыми процессами текучести расплава и смачивания им поверхности частиц твердой фазы. Закономерности явления смачивания принято описывать уравнением Юнга для краевого угла смачивания:

$$\cos\Theta = \frac{\sigma_{т-г} - \sigma_{т-ж}}{\sigma_{ж-г}}$$

и уравнением Дюпрэ для равновесной работы адгезии

$$W_a = \sigma_{ж-г} (1 + \cos\Theta),$$

где  $\sigma_{т-г}$ ,  $\sigma_{т-ж}$ ,  $\sigma_{ж-г}$  — межфазовые удельные поверхностные энергии (поверхностные натяжения) на границах раздела: твердое тело — газ, твердое тело — жидкость и жидкость — газ.

Для силикатных систем приведенные термодинамические соотношения применимы только для качественного анализа, так как межфазовые взаимодействия носят химический характер. Специфические особенности смачивания силикатными расплавами поверхности твердых тел связаны с их строением, характеризующимся наличием развитой в той или иной степени пространственной сети (каркаса), образованного сочлене-



ния тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . Прочная увязанность кремнекислородных группировок влияет на энергию частиц поверхностного слоя. Для силикатных расплавов, близких по химическому составу практическим стеклам, значение поверхностного натяжения ( $\sigma_{\text{ж-г}}$ ) относительно велико и находится в пределах 0,220–0,413 Н/м при температуре 1300°C. При полном смачивании работа адгезии достигает величины, равной удвоенному поверхностному натяжению расплава, и оказывается сопоставимой с уровнем энергии химических связей (сотни кДж/моль), превышающим энергию связей сил Ван-дер-Ваальса более чем на два порядка. Высокие значения адгезионных сил указывают на химическую природу явлений смачивания в силикатных системах. Химический характер межфазового взаимодействия подтверждает зависимость показателя смачивания (угла  $\Theta$ ) от температуры. Кривая  $\Theta = f(T)$  (рис. 2) имеет излом в точке, соответствующей температуре, называемой «порогом смачивания», после прохождения которой при нагревании интенсивность смачивания резко возрастает. Этот факт указывает на то, что для «запуска» процесса смачивания необходима определенная энергия активации, как и для протекания любой химической реакции.

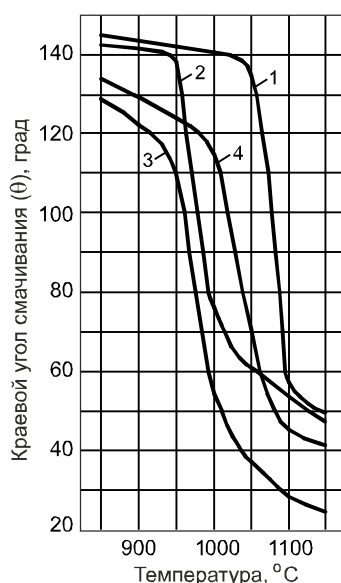
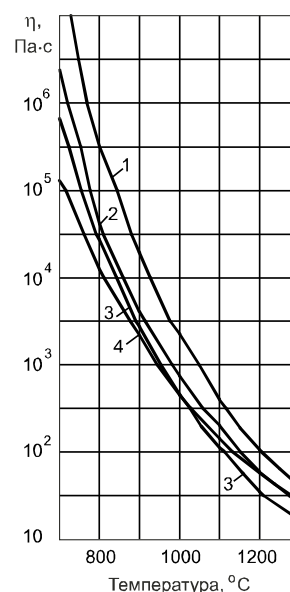


Рис. 2. Температурная зависимость краевого угла смачивания поверхности подложки из суглинка расплавами силикатных стекол марок

1 — М-4 (листовое); 2 — С93-2; 3 — С97-1; 4 — С93-1

Рис. 3. Температурная зависимость вязкости силикатных стекол марок

Условные обозначения те же, что и на рис. 2



Результаты многолетних исследований [2] по эмалированию металлов, их спаиванию со стеклом дают основания считать, что между явлениями смачивания и вязким течением силикатных расплавов существует глубокая связь. Вязкость жидкости как свойство, обусловленное межатомным взаимодействием, зависит от природы химических связей и геометрических особенностей структурных элементов (формы и размеров атомных группировок). Характерной особенностью расплавов силикатов является исключительно быстрое нарастание вязкости при охлаждении. Причина разительного отличия в значениях вязкости стеклообразных систем от расплавов металлов и ионных соединений заключена в степени полимеризации структурных элементов. От типа оксидов, входящих в состав стекол, и их концентрации зависят вид структурных группировок, характер и размеры их соединений между собой (цепочки, ленты, слои), тип и величина энергии связи. Наибольшую вязкость расплавам придают стеклообразующие оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ . Оксиды щелочных и щелочноземельных металлов и некоторых других ( $\text{PbO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) являются модификаторами стекол. Они снижают степень полимеризации, разрывая

кремнекислородную сеть, и уменьшают тем самым количество обобщенных валентных связей  $\equiv \text{Si}-\text{O}_-$  в структуре стекла. С увеличением числа кислородных атомов, приходящихся на атом кремния, снижается структурная увязанность стекла и достигается более полное экранирование центрального катиона группировки  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . Общая энергия системы становится меньше.

Вязкое течение силикатных расплавов изучалось многими исследователями. Развитию теоретических основ этого явления посвящены работы Г. Таммана, Р. Л. Мюллера, С. В. Немилова, Д. С. Сандидова. Наиболее обоснованной представляется валентная концепция вязкого течения стекла Р. Л. Мюллера [3]. Ее сущность составляют следующие положения.

— Взаимодействие атомов в стекле, образующих структурную сеть, осуществляется посредством локализованных ковалентно-ионных связей, обладающих жесткостью и близкодействием. Электронная конфигурация катиона  $\text{Si}^{4+}$  обуславливает тетраэдрическую ориентацию химических связей  $\text{Si}-\text{O}$ , лежащих в основе построения прочных пространственных сочленений из полиэдров. В отличие от ионных кристаллов малая протяженность парноэлектронных связей  $\equiv \text{Si}-\text{O}_-$  не обеспечивает перекрытия электрических полей катионов, необходимого для смещения ионов. Для этого требуется высокая энергия активации теплового движения атомов.

— При высоких температурах в условиях интенсивного колебательного движения происходит сближение атомов кремния на расстояние, при котором становятся энергетически выгодными электронные переходы, сопровождающиеся образованием новых связей  $\equiv \text{Si}-\text{O}_-$ . Новая связь формируется как акт переключения связи кремния с атома кислорода одной группировки на атом кислорода другой (соседней) группировки. Этот кратковременный процесс не требует затрат энергии, равной энергии полного разрыва связи  $\text{Si}-\text{O}$ . Сопряженное переключение кремнекислородных связей в объеме расплава равносильно структурным изменениям — относительному смещению атомных группировок.

Текущность силикатных расплавов, обусловленных трансформацией связей  $\equiv \text{Si}-\text{O}_-$ , подчиняется температурному влиянию по уравнению

$$1/\eta = c \cdot e^{-\frac{E_{\eta(T)}}{RT}},$$

где  $E_{\eta(T)}$  — энергия активизации вязкого течения (кДж/моль);

$R$  — универсальная газовая постоянная (Дж/моль·К);

$T$  — температура (К);

$C$  — постоянная величина.

Энергия активации вязкого течения зависит от температуры. При охлаждении расплава  $E_{\eta(T)}$  повышается и при приближении к  $T_g$  она становится близкой к энергии разрыва связи  $\text{Si}-\text{O}$  (430 кДж/моль). Значение  $E_{\eta(T)}$  расплавов промышленных стекол находится в пределах от 80 до 400 кДж/моль. По мнению Р. Л. Мюллера, механизм вязкого течения лежит в основе явлений диффузии, миграции, релаксации, спекания и других процессов, связанных с движением частиц в силикатных расплавах.

Приложение принципов вязкого течения силикатов к решению задач технологии керамики на основе суглинка связано с необходимостью выяснения влияния свойств стекол на характер межфазового взаимодействия. С этой целью были выполнены экспериментальные работы:

— изучено смачивание поверхности подложек из чистого суглинка расплавами силикатных стекол промышленных марок С93-1, С93-2, С97-1 и листового стекла марки М-4 (ГОСТ 111–2001);

— определены прочность на сжатие и огневая усадка образцов из смеси суглинка со стеклом указанных марок;

— исследован материал керамики методом ИК-спектроскопии.

Химический состав и свойства стекол и суглинка представлены в таблице.

| Материал             | Химический состав, вес. % |                                |      |      |      |      |                   |                  |                                | Другие оксиды                                     |
|----------------------|---------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|---|
|                      | SiO <sub>2</sub>          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO  | BaO  | PbO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |   |
| Стекло М4 (листовое) | 71,92                     | 1,38                           | 3,15 | 7,89 | —    | —    | 14,9              |                  |                                | SO <sub>3</sub> – 0,38                            |
| Стекло С93–2         | 67,5                      | 5,0                            | —    | —    | 12,0 | —    | 7,0               | 7,0              |                                | Fe <sub>2</sub> – 0,9<br>Li <sub>2</sub> O – 0,06 |
| Стекло С97–1         | 64,0                      | 4,0                            | —    | —    | 16,5 | —    | 5,0               | 9,5              |                                | Li <sub>2</sub> O – 1,0                           |
| Стекло С93–1         | 55,0                      | 2,0                            | —    | —    | —    | 30,0 | 3,8               | 9,2              | 4,0                            | —   |
| Суглинок каменский   | 64,7                      | 14,2                           | 2,11 | 4,0  | —    | —    | 1,7               | 1,84             | 4,78                           | 6,37  |

Смачивание исследовалось методом «покоящейся» капли стекла на плоской подложке (см. рис. 1, а). Подложкой служили диски из спрессованного суглинка. Капля стекла формировалась расплавлением цилиндра ( $d = 4$  мм,  $h = 4$  мм) из спрессованного стеклопорошка на поверхности подложки. Краевой угол смачивания определялся измерением увеличенной проекции капли на экран.

Определение усадки и испытание на прочность керамики проводились на кубиках с ребром 20 мм, сформованных из масс, полученных холодным вспениванием. Образцы из пеномассы использовались с целью усиления эффекта уплотнения материала при обжиге. Соотношение суглинка и стекла в исходных массах принималось равным 4:1. Изготовление образцов и измерение их свойств осуществлялось по методикам, описанным в работе [4]. ИК-спектры материалов снимались на спектрометре Scimitar FTS 2000.

Результаты опытов по смачиванию представлены на рис. 2. Анализ температурных зависимостей краевого угла смачивания и вязкости различных стекол (рис. 3) позволил установить два важных факта. Первый — наблюдается подобие в ходе кривых  $\Theta = f(T)$  и  $\eta = f(T)$ , что указывает на глубокую связь этих явлений. Второй — на всех кривых  $\Theta = f(T)$  имеются точки перегиба, соответствующие определенной температуре — температуре «порога смачивания» ( $T_{см}$ ). После ее прохождения интенсивность смачивания резко возрастает. Из кривых  $\eta = f(T)$  следует, что температуре  $T_{см}$  исследуемых стекол отвечает значение вязкости расплавов, примерно равное  $10^3$  Па·с. Здесь важно отметить и то, что при изучении других контактных явлений, связанных с расплавами стекол, также была обнаружена связь их характеристик с вязкостью. Так, температурам спекания стекол (ТСС) и начала прилипания их к твердым телам (ТПС) независимо от их химического состава соответствует вязкость, равная  $10^8$  Па·с [5].

Вывод о наличии связи между вязкостью и смачиванием подтверждают данные работы [6]. Авторами было установлено различие в смачивании расплавами двух силикатных стекол поверхности твердых силикатов: кварца, муллита, анортита, шамота и диоксида. Оказалось, что краевой угол смачивания на всех подложках у листового стекла меньше (в среднем на 10%), чем у тарного, отличающегося по составу от первого большим содержанием оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Объяснить преимущество листового стекла в смачивании можно только более низкой вязкостью расплава. Для листового стекла при температуре опыта 950°C логарифм вязкости составляет 3,65, для тарного 3,87.

Влияние вязкости стекол в нашем опыте проявилось в значениях характеристики спекания — прочности образцов на сжатие (рис. 4). Видим, что керамика, содержащая стекло марки Сл 97-1 с наименьшей вязкостью при 1050°C, обладает при одинаковой плотности наибольшей прочностью. Рост вязкости стеклофазы ведет к снижению прочности керамики. От качества смачивания зависит цементирующее действие расплава в формировании структуры черепка. Как и следовало ожидать, в такой же последовательности находятся значения другой характеристики спекания — усадки образцов. Керамика со стеклами марок С97-1, С92-2, С93-1 и листовым имели показатели объемной усадки (%) — 31, 12,5 10 и 7 соответственно. Результаты эксперимента указывают на решающую роль вязкого течения стекла в процессе спекания.

Анализ ИК-спектров керамики и исходных материалов (рис. 5) показал, что основные кристаллические фазы суглинка (кварц, полевые шпаты) сохранились после обжига в материале. На их частичное растворение в стекле указывает исчезновение слабых полос поглощения, соответствующих частотам 792,4 и 647,1 см<sup>-1</sup>. Поскольку силы, обуславливающие растворение и адгезию, идентичны, процесс спекания в системе суглинок-стекло в значительной степени обусловлен химическим взаимодействием на межфазовой границе.

Установление в процессе спекания роли поверхностного натяжения, вязкости силикатного стекла и глубинной связи ее с явлением смачива-

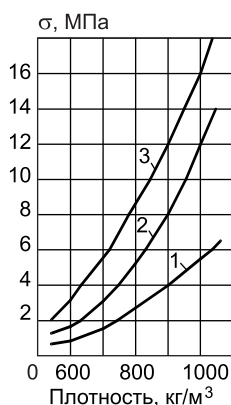


Рис. 4. Зависимость прочности образца на сжатие от плотности пористой керамики из смеси суглинка со стеклом, взятых в соотношении 4:1. Температура обжига 1050°C  
1 — М-4 (листовое); 2 — С93-2; 3 — С97-1

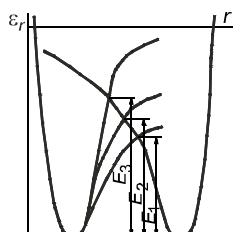


Рис. 6. Схема наложения потенциальных полей взаимодействующих атомных группировок стеклофазы и частиц суглинка (1, 2, 3)

$E_1, E_2, E_3$  — уровни энергии активации химического взаимодействия для различной силы межатомной связи в группировках твердой фазы

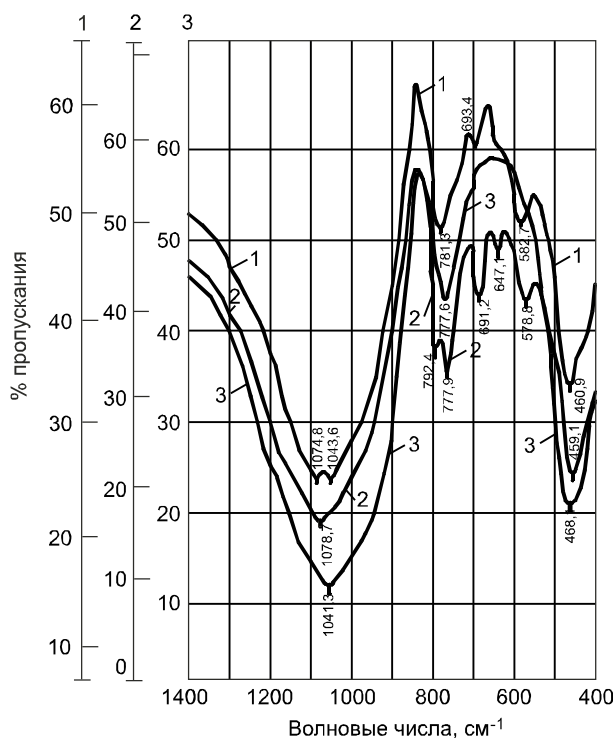


Рис. 5. ИК-спектры поглощения

1 — керамики из смеси суглинка со стеклом М-4; 2 — сугилка Каменского месторождения; 3 — стекла М-4 (листовое)

ния позволяет с учетом положений валентной концепции вязкого течения Р. Л. Мюллера сформулировать представление о механизме адгезионного взаимодействия в системе силикатное стекло — суглинок.

При обжиге сырьевой массы в состоянии физического контакта оказываются частицы стекла и суглинка (кварца, полевого шпата, оксидов различных металлов). После достижения температуры, соответствующей «порогу смачивания», на межфазовой границе активизируется физико-химическое взаимодействие, проявляющееся в виде смачивания. Смачивание как процесс формирования межфазовых связей протекает по трансляционному механизму. Совокупность сложных деформационных и валентных колебаний атомных группировок обеих фаз приводит к «перемешиванию» атомов кислорода на межфазовой поверхности. При температурах 950–1050°C интенсивность колебаний атомов достигает такого уровня, при котором в результате наложения связывающих орбиталей групп  $\equiv \text{Si}-\text{O}-$  поверхностного слоя стекла и групп  $\equiv \text{Si}-\text{O}-$  и  $-\text{Me}-\text{O}-$  суглинка происходит трансформация кремнекислородных связей структурной сетки стекла. Связь кремния с «мостикового» кислорода переключается на атом кислорода твердой фазы, оказавшегося в потенциальном поле сильного катиона  $\text{Si}^{4+}$ . Возникают связывающие цепочки атомов  $\text{Si}_{\text{ст}}-\text{O}-\text{Si}_{\text{тв.ф}}$  и  $\text{Si}-\text{O}-\text{Me}_{\text{тв.ф}}$ . Реализация химической реакции по такой схеме не требует полного разрыва связей  $\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv$  структурной сетки стекла. На это указывает сравнительно малая энергия активации процесса смачивания. Например, смачивание оксидных пленок различных металлов боросиликатным стеклом происходит при энергиях активации от 180 до 290 кДж/моль [2].

Энергия активации рассматриваемой химической реакции — акта трансформации (переключения связи  $\text{Si}-\text{O}$ ) соответствует потенциальному барьеру перехода системы от стадии физического контакта к химическому взаимодействию. Физический смысл потенциального барьера можно представить, рассматривая схему наложения кривых зависимостей потенциальных энергий взаимодействующих атомных группировок  $\equiv \text{Si}-\text{O}-$  в стекле и  $\equiv \text{Si}-\text{O}-$  и  $-\text{Me}-\text{O}-$  в керамике (рис. 6). Для локализованной жесткой ковалентной связи  $\equiv \text{Si}-\text{O}-$  характерен крутой ход кривой зависимости  $E=f(r)$ , а для ионной дальнодействующей эластичной связи  $-\text{Me}-\text{O}-$  более пологий. Пересечение кривых  $E=f(r)$  позволяет оценить величину энергии активации акта переключения связи кремния с кислородом. Как видим, уровень потенциального барьера зависит от энергии химических связей взаимодействующих атомных группировок. Энергетическое состояние контактирующих фаз можно определить по энергии образования соединений ( $\Delta G$ ), входящих в их состав. Опыт показывает, что чем меньше величина  $\Delta G$  химического соединения (силиката, оксида), тем лучше оно смачивается расплавом стекла [2]. С другой стороны, энергия кремнекислородных связей структурной сетки стекла может быть понижена введением в его состав модифицирующих оксидов или растворением в нем материала твердой фазы.

**Выводы.** 1. Рассмотрено влияние поверхностного натяжения и вязкости силикатных стекол на процесс спекания керамики на основе глин. Эти свойства проявляют себя в возникновении при смачивании капиллярного давления и текучести расплава.

2. Установлена связь явлений смачивания поверхности зерен суглинка с вязкостью расплава стекла. Для исследуемых марок стекол определена температура «порога смачивания». Этой температуре отвечает вязкость расплава в пределах от  $10^{3.2}$  до  $10^{2.8}$  Па·с.

3. ИК-спектроскопией подтверждено растворение материала твердой фазы в расплаве, что указывает на химический характер межфазового взаимодействия.

4. Изложены представления о механизме адгезионного взаимодействия в системе суглинок–стекло. Прочность керамики обеспечивается образованием межфазовых связей Si–O–Si и Si–O–Me путем переключения связи кремния с «мостикового» кислорода в стекле на атом кислорода твердой фазы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кингери У. Д. Введение в керамику/У. Д. Кингери: Пер. с англ.— М., 1967.— 499 с.
2. Безбородов В. Г. Механизм соединения стекла с металлом/В. Г. Безбородов.— Новосибирск: НГАСУ, 2003.— 200 с.
3. Мюллер Р. Л. Валентная теория вязкости и текучести в критической области температур для тугоплавких стеклообразующих веществ/Р. Л. Мюллер//Журн. прикл. химии.— 1955.— Т. 28.— № 10.— С. 1077–1087.
3. Безбородов В. Г. Спекание вспененных глинистых масс на основе суглинка/В. Г. Безбородов, Л. Ф. Меденцов, О. Б. Быкасова и др./Изв. вузов. Строительство.— 2007.— № 10.— С. 28–34.
5. Алексеенко М. П. Когезия и адгезия горячего стекла/М. П. Алексеенко.— М.: Машиностроение, 1969.— 175 с.
6. Баталин Б. С. Зависимость смачивания подложки расплавом стекла от состава подложки/Б. С. Баталин, Н. А. Правина//Изв. вузов. Строительство.— 1995.— № 3.— С. 55–59.

© Безбородов В. Г., Меденцов Л. Ф., Быкасова О. Б., Меденцова Н. Л., 2008

Получено 14.12.07

УДК 666.913 : 66.041.9

**И. И. ГОРЮНОВ**, канд. техн. наук, доц., **А. А. АЛЕШКОВСКАЯ**, **Е. М. ЧЕБОТАЕВА**, аспиранты (Московский государственный строительный университет)

#### ПОСТРОЕНИЕ УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ГИПСА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Приведена методика построения математической модели вращающейся печи при обжиге сыпучих строительных материалов. На примере процесса производства строительного гипса в прямоточной печи показана эффективность замены нелинейной динамической модели в частных производных моделью, состоящей из нескольких последовательно включенных зон идеального перемешивания.

При математическом моделировании процессов обжига вяжущих материалов в печах с сосредоточенными параметрами, например с кипящим слоем, обычно используются системы линейных и нелинейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых основные параметры являются функцией только одной независимой переменной: либо времени, либо температуры обжига [1].

Однако во вращающихся печах основные параметры, характеризующие течение процесса (температуры, концентрации сырья и продуктов обжига), зависят не только от времени, но и от пространственных координат. Для таких агрегатов с распределенными параметрами предложены три типа математических моделей [2]:

— идеального вытеснения

$$C_i / t = - ( C_i / L ); \quad (1)$$

— однопараметрическая

$$C_i / t = - ( C_i / L ) + D_{iL} ( {}^2 C_i / L^2 ) \pm W_i; \quad (2)$$



— двухпараметрическая

$$C_i / t = - (C_i / L) + D_L (2C_i / L^2) + D_{iR} [(1/r) (C_i / t) + (2C_i / t^2)] \pm W_i, \quad (3)$$

где  $L$  — координата, измеряемая вдоль оси вращающегося барабана печи (длина агрегата);

$r$  — координата, перпендикулярная оси барабана печи (радиус агрегата);

$D_L, D_R$  — коэффициенты продольного и радиального перемешивания материала в барабане печи.

Как видно из приведенных моделей вращающихся печей, связывающих технологические параметры с независимыми переменными, все они описываются уравнениями в частных производных, аналитического решения которых практически не существует. В этих случаях обычно пользуются численным методом, состоящим в замене частных производных на отношения конечных разностей, в результате чего дифференциальные уравнения обращаются в алгебраические, разностные [3].

Более удобный метод численного решения, резко сокращающий число вычислительных операций, — переход от уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, который осуществляется заменой всех частных производных отношением конечных разностей, кроме одной, являющейся независимой переменной в системе полученных новых уравнений [4]. При таком методе вся область, в которой ищется решение, разбивается на ряд зон. В этом случае материальные и тепловые балансы процесса обжига, составленные для печей кипящего слоя, могут решаться для каждой из зон последовательно, причем число уравнений в системе должно соответствовать числу принятых зон.

Число зон определяется технологическими параметрами и проявляется в характере распределения времени пребывания материала в рабочем пространстве агрегата. Этот характер распределения подвержен статистическим законам и может быть найден по виду сигнала, проходящего через барабан вращающейся печи. В качестве такого сигнала нами использовалась подача индикаторного вещества на входе в печь в виде дельта-функции (импульсный ввод индикатора).

Значения концентрации индикатора на выходе агрегата получены на короткой вращающейся печи (сушильном барабане) 1,6 × 8 м, работающей по прямотоку:

|                                    |   |     |   |     |     |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |
|------------------------------------|---|-----|---|-----|-----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|
| Время ( ), мин                     | 0 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10  | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 | 22,5 | 25 | 27,5 | 30 | 32,5 | 35 |
| Концентрация индикатора (g), вес % | 0 | 1,5 | 3 | 4   | 4,8 | 5    | 5  | 5,5  | 4  | 3    | 2  | 1,5  | 1  | 0,5  | 0  |

Определение функции распределения  $F( )$  выполнялось по кривой отклика ( $C$  — кривая), которая была записана в виде

$$F = \int_0^{\infty} F( ) d . \quad (4)$$

Для этого вначале была вычислена сумма значений ( g)Δ при интервале времени отбора проб Δ = 2,5 мин:

$$( g)Δ = 102,5 \text{ вес. \%} \cdot \text{мин.}$$

Значения функции распределения  $F( ) = f / ( g)Δ$  в зависимости от времени даны ниже.

|                          |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |
|--------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| , мин                    | 0 | 2,5   | 5     | 7,5   | 10    | 12,5  | 15    | 17,5  | 20    | 22,5  | 25   | 27,5  | 30   | 32,5  |
| $F( ), \text{ мин}^{-1}$ | 0 | 0,014 | 0,029 | 0,039 | 0,048 | 0,049 | 0,049 | 0,054 | 0,039 | 0,029 | 0,02 | 0,014 | 0,01 | 0,005 |

Для получения функции  $F$  было вычислено среднее время пребывания индикатора в барабане печи:

$$\tau' = g / g = 14 \text{ мин},$$

и затем приведено к безразмерному виду:

$$\tau'' = \tau' / \tau' = \tau' / 14,$$

а значение  $F(\tau'')$  к  $F$ :  $F = F(\tau'') = 14g / (g) \Delta$ .

На рис. 1 показана кривая распределения, соответствующая полученным значениям величин  $\tau''$  и  $F$ :

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\tau''$ | 0,18 | 0,36 | 0,54 | 0,71 | 0,89 | 1,07 | 1,25 | 1,43 | 1,61 | 1,78 | 1,96 | 2,14 |
| $F$      | 0,20 | 0,41 | 0,55 | 0,65 | 0,68 | 0,68 | 0,75 | 0,55 | 0,41 | 0,27 | 0,14 | 0,07 |

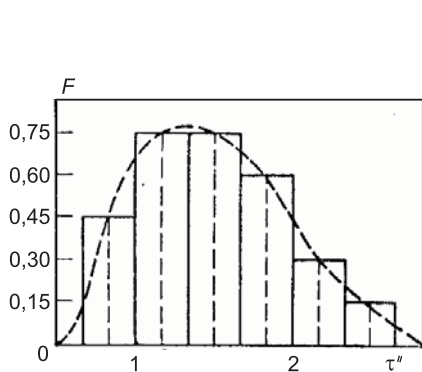


Рис. 1. Построение кривой распределения

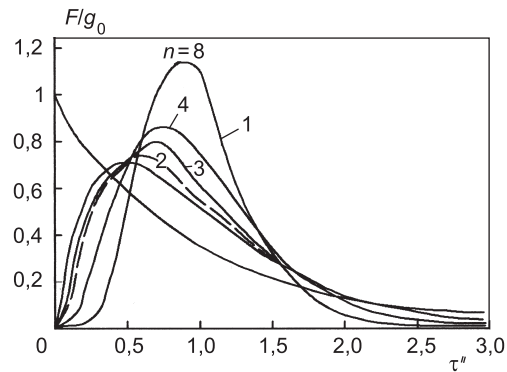


Рис. 2. Сравнение экспериментальной кривой (---) и расчетных кривых (1, 2, ..., 8) по импульсному методу.

$n$  — число зон идеального перемешивания

Для полученной кривой распределения необходимо знание величины критерия Пекле ( $Pe = L / D_L$ ), характеризующего продольное перемешивание материала в барабане печи. С этой целью по уравнению

$$\sigma_{\tau}^2 = [\sum x_i^2 f(x_i) / \sum f(x_i)] - [\sum x_i f(x_i) / \sum f(x_i)]^2, \quad (5)$$

(где  $f(x_i) = g_i$ ;  $\sum x_i f(x_i) = \sum g_i \tau_i$ ;  $\sum x_i^2 f(x_i) = \sum g_i \tau_i^2$ ) была найдена величина дисперсии  $\sigma_{\tau}^2$ , для чего предварительно были вычислены отдельные члены уравнения (5):  $g_i = 41$  (вес. %);  $\sum g_i \tau_i = 567,5$  (вес. % · мин);  $\sum g_i \tau_i^2 = 9626,89$  (вес. % · мин<sup>2</sup>), следовательно,  $\sigma_{\tau}^2 = 38,9$  — 39.

В безразмерных единицах, согласно уравнению,  $\tau''^2 = \sigma_{\tau}^2 / (\tau')^2 = 39 / 196 = 0,2$  и при  $\tau''^2 = 2D_L / L = 0,2$  было определено значение критерия Пекле:  $Pe = L / D_L = 10$ .

Учитывая, что при  $D_L / L = 0$  ( $Pe = \infty$ ) имеет место идеальное вытеснение, а при  $D_L / L = \infty$  ( $Pe = 0$ ) — идеальное перемешивание, считали, что критерий Пекле для полученной нами кривой распределения показывает промежуточный режим, между идеальным перемешиванием и идеальным вытеснением.

При определении конкретного числа зон идеального перемешивания был использован способ подбора решения, соответствующего экспериментальной кривой распределения по уравнению:

$$F / g_0 = n^n (\tau'')^{n-1} \exp(-n \tau'') / (n - 1)! \quad (6)$$

Графическая интерпретация решения уравнения (6) представлена на рис. 2, анализ которого показал, что наилучшая воспроизводимость

экспериментальной кривой возможна при числе зон, равном 2–3, т.е. ( $2 < n \leq 3$ ). Здесь важно отметить, что чем больше число зон, тем ближе математическая модель к описываемому процессу обжига, но это требует большого числа операционных блоков аналогового компьютера или больших затрат машинного времени при ее решении на цифровой машине. В нашем случае удовлетворительная точность решения достигается при разделении области существования решения на неожиданно малое число зон. Причем разделение этого пространства по длине барабана печи может быть неравномерным: там, где градиент измерения переменных параметров обжига велик, длина зоны должна быть больше, а там, где мал, — меньше. Поэтому такое решение целесообразно принимать при участии строителя-технолога — специалиста в области производства гипсовых вяжущих материалов, который может заранее предложить, как разделить вычисленное число зон по длине реакционного пространства печи. Точность аппроксимации установленного числа зон печи может быть значительно повышена за счет более точного определения их длины.

Таким образом, основой зонной модели является представление об идеальном перемешивании в пределах зон, расположенных последовательно, и отсутствии перемешивания между зонами. Параметром, характеризующим модель, служит число зон  $n$ . Поэтому математическое описание зонной модели обжига гипса во вращающейся печи должно включать  $n$  дифференциальных уравнений материальных и тепловых балансов процесса вида:

$$(dC_i/dt) (1/n) = (1/t_n) (C_{i-1} - C_i). \quad (7)$$

Предложенная методика определения числа зон в математической модели обжига гипса во вращающейся печи может быть использована для всех типов вращающихся агрегатов. Однако в каждом конкретном случае необходимо проведение дополнительного эксперимента и определение функции распределения для печей других габаритных размеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов И. И. Автоматизация управления процессом обжига сырья в производстве строительно-технологической извести: Автореф. канд. дис./И. И. Горюнов. — М.: МГСУ, 1999. — 19 с.
2. Рульников А. А. Математическое моделирование процесса обжига природного гипса/А. А. Рульников, А. Г. Комар//Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1982. — № 3. — С. 68–73.
3. Цымбал В. П. Математическое моделирование металлургических процессов/В. П. Цымбал. — М.: Металлургия, 1988. — 240 с.
4. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах/Н. П. Бусленко. — М.: Наука, 1984. — 356 с.

© Горюнов И. И., Алешковская А. А., Чеботаева Е. М., 2008

Получено после доработки 26.11.07

## КОМПАКТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Предлагается эффективная структура данных для представления информационных моделей топографических поверхностей в виде сетки произвольных непересекающихся треугольников. Использование предлагаемой структуры позволяет уменьшить необходимый объем машинной памяти более чем в 2 раза по сравнению с известными структурами данных. Компактное представление триангуляции применимо в различных приложениях метода конечных элементов, если в качестве таких элементов используются треугольники.

Универсальной информационной моделью топографических поверхностей являются *плоская триангуляция* — нерегулярная сетка непересекающихся треугольников. При таком представлении различаются три сущности: *вершины*, *ребра* и *треугольники* и два вида отношений: *смежности* и *инцидентности*. В процессе построения плоской триангуляции и решения задач с ее использованием приходится отвечать на следующие вопросы:

- 1) какие вершины являются смежными для вершины  $v$ ;
- 2) какие ребра инцидентны вершине  $v$ ;
- 3) какие треугольники инцидентны вершине  $v$ ;
- 4) какие вершины инцидентны ребру  $e$ ;
- 5) какие ребра являются смежными ребру  $e$ ;
- 6) какие треугольники инцидентны ребру  $e$ ;
- 7) какие вершины инцидентны треугольнику  $t$ ;
- 8) какие ребра инцидентны треугольнику  $t$ ;
- 9) какие треугольники являются смежными для треугольника  $t$ .

Для представления триангуляции осуществляется индексация вершин, ребер и треугольников — отображение на подмножество натуральных чисел  $I: V \rightarrow \{1, 2, \dots, |V|\}$ ,  $J: E \rightarrow \{1, 2, \dots, |E|\}$ ,  $K: T \rightarrow \{1, 2, \dots, |T|\}$ , где  $V$ ,  $E$  и  $T$  соответственно множество вершин, ребер и треугольников. Число треугольников  $n_t$  и число ребер  $n_e$  плоской триангуляции, являющейся односвязной областью, выражается равенствами:

$$n_t = 2(n - 1) - m; \quad (1)$$

$$n_e = 3(n - 1) - m, \quad (2)$$

где  $n$  — число всех вершин;  $m$  — число граничных вершин триангуляции.

Представление плоской триангуляции может осуществляться разными способами. Наиболее полно они были описаны, вероятно, в статье Л. де Флориани [1]. По сути, описание плоской триангуляции сводится к представлению отношений смежности и/или инцидентности. В табл. 1 перечислены все возможные отношения в плоской триангуляции.

Число элементов, необходимых для представления одного отношения, равно  $6(n - 1) - 2m$  или  $6(n - 1) - 3m$ . Кроме памяти, необходимой для хранения тех или иных отношений, требуется пропорциональный  $3n$  объем памяти для хранения координат и высот исходных точек. Таким образом, для представления всей информации об одной точке триангуляции требуется 21 элемент. Следовательно, хранение данных о триангуляции требует почти 100 байт на каждую вершину. Поэтому проблема разработки структур для представления триангуляции продолжает оставаться актуальной [2].

Таблица 1

| Отношения в триангуляции |                           |                                   |                 |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| № п.п                    | Отношение                 | Структура отношений               | Число элементов |
| 1                        | Вершина — вершина         | $v_i - v_{i_1}, v_{i_2}, \dots$   | $2n_e$          |
| 2                        | Вершина — ребро           | $v_i - e_{j_1}, e_{j_2}, \dots$   | $2n_e$          |
| 3                        | Вершина — треугольник     | $v_i - t_{k_1}, t_{k_2}, \dots$   | $3n_t$          |
| 4                        | Ребро — вершина           | $e_j - v_{i_1}, v_{i_2}$          | $2n_e$          |
| 5                        | Ребро — ребро             | $e_j - e_{j_1}, e_{j_2}, \dots$   | $2n_e$          |
| 6                        | Ребро — треугольник       | $e_j - t_{k_1}, t_{k_2}$          | $2n_e$          |
| 7                        | Треугольник — вершина     | $t_k - v_{i_1}, v_{i_2}, v_{i_3}$ | $3n_t$          |
| 8                        | Треугольник — ребро       | $t_k - e_{j_1}, e_{j_2}, e_{j_3}$ | $3n_t$          |
| 9                        | Треугольник — треугольник | $t_k - t_{k_1}, t_{k_2}, t_{k_3}$ | $3n_t$          |

Таблица 2

Представление регулярной триангуляции

| Вершина |        |       |        |          |
|---------|--------|-------|--------|----------|
| Текущая | Задняя | Левая | Правая | Передняя |
| 1       | 7      | 4     | 8      | 9        |
| 2       | 0      | 0     | 7      | 5        |
| 3       | 10     | 1     | 0      | 8        |
| 4       | 5      | 0     | 0      | 0        |
| 5       | 2      | 0     | 1      | 4        |
| 6       | 0      | 2     | 10     | 7        |
| 7       | 6      | 5     | 3      | 1        |
| 8       | 3      | 9     | 0      | 0        |
| 9       | 1      | 4     | 0      | 0        |
| 10      | 0      | 7     | 0      | 3        |

В формулах (1) и (2) можно заметить, что число треугольников не превышает  $2n$ , а число ребер триангуляции —  $3n$ . Поэтому можно попытаться найти в хаотичном распределении вершин какую-либо закономерность и каждой точке поставить в соответствие не более двух инцидентных ей треугольников и не более трех инцидентных ребер таким образом, чтобы их номера были функцией от номера вершины.

Такую зависимость можно установить, если использовать структуру, названную «птичьей лапой» (ПЛ) и представленную на рис. 1, где стрелка указывает направление движения,  $B$  — задняя,  $C$  — текущая,  $L$  — левая,  $R$  — правая и  $F$  — передняя вершины по ходу движения. Последовательность смежных задних и передних вершин образует *траверс*. На рис. 1 последовательность вершин ( $B, C, F$ ) — участок траверса.

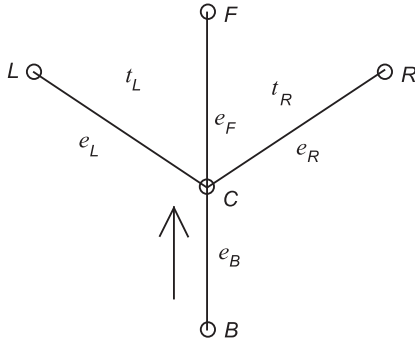


Рис. 1. Структура «птичья лапа»

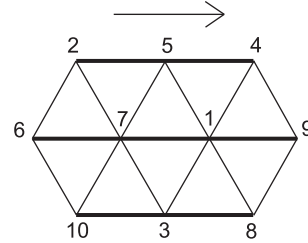


Рис. 2. Регулярная триангуляция

Если текущая вершина имеет номер  $i$ , то ей можно поставить в соответствие три ребра ( $e_L, e_F$  и  $e_R$ ) и два треугольника ( $t_L$  и  $t_R$ ), инцидентные ребру  $e_F$ . Номера левого и правого треугольников при этом можно определить как функции от номера текущей вершины  $i$ :

$$\left. \begin{aligned} t_L(i) &= 2i - 1 \\ t_R(i) &= 2i \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Аналогично можно установить порядок индексации ребер, например:

$$\left. \begin{aligned} e_L(i) &= 3i - 1 \\ e_F(i) &= 3i \\ e_R(i) &= 3i + 1 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

В известных структурах для представления триангуляции требуется дублирование одних и тех же отношений. Структура ПЛ позволяет хранить не более  $4n$  элементов: указатели на заднюю, левую, правую и следующую вершину траверса. Избыточным в каждом экземпляре этой структуры является указатель на заднюю вершину, и общее число таких указателей равно  $n$ . Это число минимально и не так велико по сравнению с другими представлениями.

Применение структуры ПЛ для представления регулярной триангуляции не вызывает проблем. Хотя триангуляция на рис. 2 является регулярной, ее вершинам номера присвоены случайным образом, как это имеет место при нерегулярной триангуляции.

В данном представлении триангуляции наблюдается полная регулярность, за исключением конечных вершин траверсов 4, 9 и 8. Они не имеют следующих вершин (и треугольников), что может служить признаком конечной вершины траверса. Начальная вершина разомкнутого траверса не имеет предыдущей точки, поэтому признаком начальной вершины траверса служит значение  $v_B = 0$ .

Для всех конечных вершин траверсов указываются только левые или только правые вершины. Если указывать и те и другие, то конечные ребра будут представляться дважды, причем с разными номерами. Так как номера ребер и треугольников являются функциями от номера текущей вершины, при использовании структуры ПЛ они не указываются, а вычисляются по формулам (3) и (4) соответственно. Регулярная триангуляция, изображенная на рис. 2, представлена в табл. 2.

В регулярной триангуляции вершины любого треугольника принадлежат двум траверсам. Два соседних траверса ограничивают ряд треугольников. Траверсу может принадлежать только одно ребро треугольника, два других ребра соединяют вершины разных траверсов. Очевидно, что ориентация плоской триангуляции не влияет на структуру данных. Кроме того, регулярность плоской триангуляции можно нарушить с помощью любого топологического преобразования координатной плоскости, что не отразится на ее представлении. Примером такой триангуляции служит рис. 3, где слева изображены горизонтали, а справа — триангуляция, построенная по выбранным на них точкам. Нетрудно видеть, что в этом примере горизонтали играют роль траверсов и их изломанность не влияет на представление триангуляции.

Таким образом, существуют «хорошие» поверхности, представляемые с помощью структуры ПЛ, но возникает вопрос о возможности представления с ее помощью любой триангуляции. Или: каким условиям должна отвечать плоская триангуляция, чтобы было возможно использование структуры ПЛ?

Идиллия, подобная представленной на рис. 3, нарушается, если на поверхности имеются точки локальных экстремумов и седлообразные участки либо исходные данные содержат другие характерные точки, не принадлежащие горизонталям. Можно показать, что структура ПЛ не по-

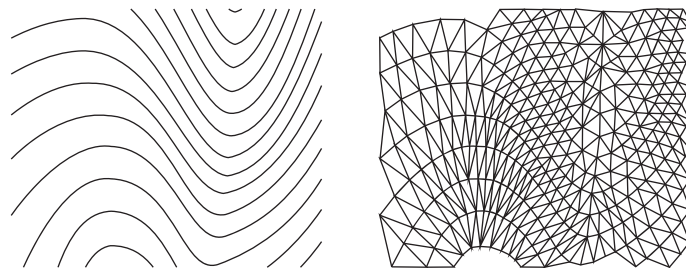


Рис. 3. Построение триангуляции по горизонталям



зволяет представить произвольную нерегулярную триангуляцию. Причина заключается в нарушениях (аномалиях) регулярности триангуляции. Можно выделить два типа таких аномалий, одну из которых назовем аномалией конечных вершин траверсов или аномалией регулярности первого типа. Другой тип аномалий возникает при вставке вершин в существующую триангуляцию. Его особенность заключается в том, что триангуляция дополняется вершиной, лежащей между двумя траверсами и не принадлежащей ни одному из них. В общем случае может потребоваться вставка между двумя траверсами нескольких следующих друг за другом вершин, образующих новый траверс.

Ситуацию с аномалиями можно рассматривать иначе и интерпретировать как проблему не вставки траверсов, а *бифуркации* (разделения) и *слияния* траверсов. Если на рис. 4 двигаться слева направо, то будет иметь место бифуркация, при движении в противоположном направлении — слияние двух траверсов. Таким образом, бифуркация и слияние траверсов являются зеркальным отражением друг друга. На рис. 4 справа

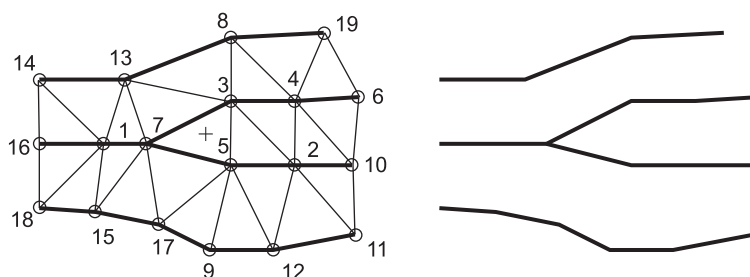


Рис. 4. Бифуркация и слияние траверсов

представлен скелет этой триангуляции в виде траверсов. Вершину, в которой происходит разделение траверса на два, будем называть вершиной бифуркации (траверсов), а вершину, в которой происходит слияние двух траверсов, — вершиной слияния.

Возможны более сложные случаи бифуркации и слияния траверсов. На рис. 5, а из вершины А исходит несколько траверсов (направление движения указано стрелкой). Назовем подобные точки вершинами  $n$ -бифуркации или множественной бифуркации. На рис. 5, б показана вершина  $n$ -слияния или множественного слияния. Подобные ситуации возникают чаще всего в начале и конце траверсов. На рис. 5, в показана внутренняя вершина триангуляции, одновременно являющаяся вершиной слияния и бифуркации.

Чтобы обойти проблемы, связанные с бифуркациями и слияниями, можно перестроить триангуляцию так, чтобы она не содержала вершин бифуркации и слияния. Но такая модификация затронет всю триангуляцию, даже если и будет принципиально возможной.

Таким образом, если в триангуляции отсутствуют бифуркации и слияния, то такая триангуляция может быть представлена структурой

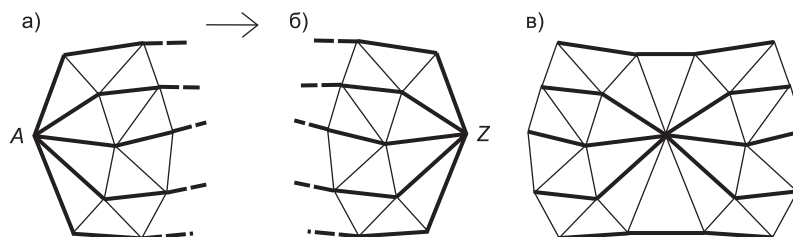


Рис. 5.  $n$ -бифуркация и  $n$ -слияние

ПЛ. Вставка вершин между траверсами влечет за собой бифуркацию и слияние траверсов. Следовательно, проблема представления триангуляции сводится к представлению бифуркаций и слияний траверсов.

В конечном итоге проблема состоит в представлении номеров многих ребер и треугольников, инцидентных вершинам бифуркации, каждая из которых имеет только один номер. Следовательно, вершине бифуркации необходимо поставить в соответствие не один номер, а несколько номеров, являющихся ее синонимами. Число таких синонимов в вершинах бифуркации и только в них может увеличиваться по мере необходимости.

Если у некоторой вершины несколько синонимов, то они образуют кольцевую структуру. При этом синонимы играют роль указателей списка. Новому синониму для некоторой вершины присваивается номер на 1 больше, чем число номеров вершин, включая синонимы. После чего число номеров вершин триангуляции (а не число вершин триангуляции) увеличивается на 1. Синоним с наименьшим значением можно считать «реальным» именем вершины, по которому выбираются значения координат и высот из перечня исходных точек. Создание синонимов влечет за собой минимальное увеличение накладных расходов на представление триангуляции. Общий объем памяти, необходимый для такого представления триангуляции, существенно меньше (в 2 раза), чем при других представлениях.

С целью реализации идеи синонимов можно расширить структуру ПЛ, добавив к ней поле «синоним». Новая структура  $P$  данных о каждой вершине триангуляции, которую назовем *компактным представлением триангуляции* (КПТ), будет иметь вид  $P = (C, S, B, L, R, F)$ , где  $C$  — номер текущей вершины,  $S$  — ее синоним,  $B$  — задняя вершина траверса для текущей вершины,  $L$  — левая вершина (на левом траверсе),  $R$  — правая вершина,  $F$  — передняя вершина. Значение  $S = 0$  указывает на отсутствие синонимов вершины. Представление всей триангуляции в таком случае содержит перечень координат и высот вершин триангуляции и совокупность всех структур  $P$ , включая синонимы.

Представление триангуляции может начинаться с некоторой внутренней вершины, вокруг которой создается первый траверс, затем все последующие в порядке их удаления от центральной вершины. Движение по всем траверсам осуществляется только в одном направлении: либо по часовой стрелке, либо против. Но можно, выбрав в качестве начальной любую граничную вершину триангуляции, представлять траверсы разомкнутыми.

Рассмотренное компактное представление триангуляции применимо в различных приложениях метода конечных элементов, когда в качестве таких элементов используются треугольники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Floriani L. Surface representations based on triangular grids / L. De Floriani // The Visual Computer. — V. 3. — P. 27–50.
2. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. — 128 с.

© Кравченко Ю. А., 2008

Получено после доработки 27.11.07

**В. В. ГЕРАСИМОВ**, д-р техн. наук, проф., **Е. С. ЛАБУТИН**, **Н. В. ПЯТЫХ**, инженеры, **О. Ю. МИХАЛЬЧЕНКО**, асп. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

## УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Рассматриваются методические положения аналитического подхода по управлению организационно-экономической надежностью инвестиционных проектов. Подход включает модели и методы разработки параметров зон организационно-экономической безопасности проектов с учетом внешних и внутренних факторов риска.

Управление деятельностью строительных компаний осуществляется в форме управления функционированием и развитием. В первом случае задачей компаний является формирование портфеля объектов, которыми обеспечивается поддержание эффективности деятельности, во втором — формирование портфеля проектов развития, которыми обеспечивается рост эффективности деятельности компании. Управление эффективностью деятельности средствами проектов обусловлено качеством настройки его параметров на ожидаемые изменения факторов внешней и внутренней среды, которые характеризуются динамикой их отклонений по всем этапам реализации проекта. Выделяются три состояния проектных параметров: нормативное — без учета факторов риска изменения параметров во времени; расчетное — с учетом факторов риска, учтенное в плане проекта; фактическое — с учетом фактического риска реализации проекта. Учет возможных последствий от влияния рисков еще не имеет достаточно разработанной нормативно-методической базы, что приводит к недоучету этих последствий в проектной документации.

В настоящее время в теории и практике наиболее разработанными являются методология организационно-технологической надежности для детерминированных условий инженерных проектов и методология экономических рисков инвестиционных проектов [1]. Этими подходами не решается задача интеграции организационных решений в инженерной части и экономических в экономической части, которые должны определять единую стохастическую характеристику проекта. Это снижает достоверность проектных решений при их разработке и способствует повышению цен строительной продукции при реализации проектов.

Предложенный методологический подход основан на представлении организационно-экономической надежности (ОЭН) как качества состояния экономических и организационных решений проекта в условиях риска. Проектные параметры представляются в двух форматах: расчетный, определяемый в соответствии с методологией проектного риска; фактический, определяемый в соответствии с методологией ситуационного управления риском [2–4]. Два формата проекта являются этапными разработками проектного портфеля и используются на различных стадиях жизненного цикла проекта. Задача первого формата — установление ожидаемых потерь, вызываемых рисками организационно-экономических решений проекта, задача второго — минимизации фактических отклонений параметров от их плановых значений.

Значение ОЭН формата плана определяется моделью вида:

$$H_{\Sigma}^{\Pi} = \frac{D_t - \Sigma \Delta D_{\Sigma,t}}{D_t}; \quad (1)$$

$$\Delta D_{\vartheta,t} = (P(O, Ц, И, И_{\Phi}), P(Z_M, Z_P, A_M, Z_{\vartheta})); \quad (2)$$

$$H_o^n = \frac{D_t - \Sigma \bar{\Delta} D_{o,t}}{D_t}; \quad (3)$$

$$\Delta D_{o,t} = (P(t_{\vartheta}, t_P, t_c, t_{\vartheta}), P(Z_{\vartheta}, Z_P, Z_c, Z_{\vartheta})); \quad (4)$$

$$H_{o\vartheta}^n = \frac{D_t - (\Sigma \bar{\Delta} D_{\vartheta,t} + \Sigma \bar{\Delta} D_{o,t})}{D_t}, \quad (5)$$

где  $H_{o\vartheta}^n$  — организационно-экономическая надежность формата плана проекта;

$D_t$  — доход проекта в  $t$ -м периоде жизненного цикла проекта;

$P$  — риск проекта;

$\Delta$  — индекс изменения параметра;

$O$  — объем продаж;

$Ц$  — цена продукции;

$И$  — инвестиции проекта;

$И_{\Phi}$  — инфляция;

$Z_M$  — материальные затраты;

$Z_P$  — заработная плата;

$A_M$  — амортизация;

$Z_{\vartheta}$  — затраты на инвестиции;

$t_{\vartheta}, t_P, t_c, t_{\vartheta}$  — соответственно продолжительности этапов исследования, проектирования, строительства, эксплуатации;

$Z_{\vartheta}, Z_P, Z_c, Z_{\vartheta}$  — соответственно затраты этапов исследования, проектирования, строительства, эксплуатации проекта.

Уравнениями (1)–(4) устанавливаются параметры локальной ОЭН, определяющие риск и величину снижения дохода, а (5) — интегрированной, определяющей величину характеристики ОЭН стадии разработки плана проекта. Идентификация факторов, определяющих эти изменения, основана на использовании существующих методов качественного анализа с учетом экспертных оценок. Таким образом, характеризуется уровень ожидаемых потерь дохода, которые могут быть снижены за счет страхования проектных рисков.

Значение ОЭН формата реализации проекта определяется моделью вида:

$$H_{\vartheta}^{\Phi} = \frac{H_{\vartheta}^n - (\bar{\Delta} H_{\vartheta}^{\Phi})}{H_{\vartheta}^n}, \text{ если } H_{\vartheta}^{\Phi} \leq H_{\vartheta}^n, \text{ то } y = 1, \quad (6)$$

$$H_{\vartheta}^{\Phi} > H_{\vartheta}^n, \text{ то } y = 0;$$

$$\Delta H_{\vartheta}^{\Phi} = H_{\vartheta}^{\Phi} - H_{\vartheta}^n; \quad (7)$$

$$H_o^{\Phi} = \frac{H_o^n - (\bar{\Delta} H_o^{\Phi})}{H_o^n}, \text{ если } H_o^{\Phi} \leq H_o^n, \text{ то } y = 1, \quad (8)$$

$$H_o^{\Phi} > H_o^n, \text{ то } y = 0;$$

$$\Delta H_o^{\Phi} = H_o^{\Phi} - H_o^n; \quad (9)$$

$$H_{o\vartheta}^{\Phi} = \frac{D_t - ((\bar{\Delta} D_{\vartheta}^{\Phi})_t + (\bar{\Delta} D_{o,t}^{\Phi}))}{D_t}, \quad (10)$$

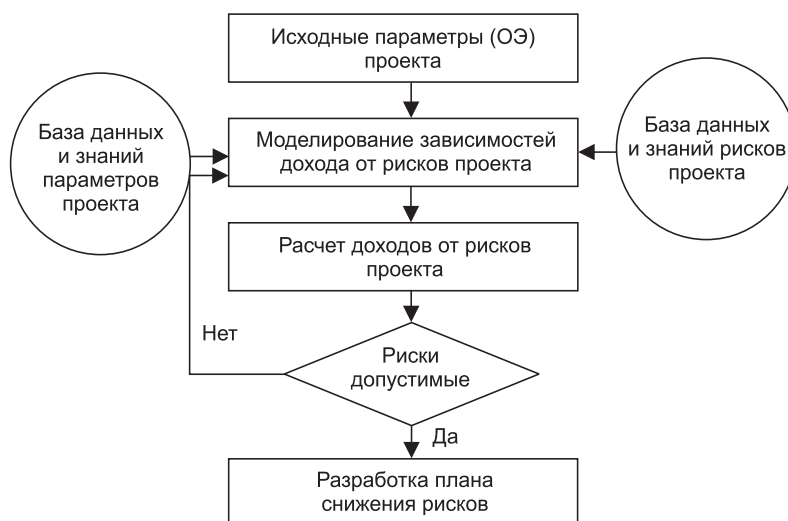
где  $H_{o\vartheta}^{\Phi}$  — организационно-экономическая надежность реализации проекта;

$y$  — решение на управление риском проекта;

$\Delta H_{\vartheta}^{\Phi}, \Delta H_o^{\Phi}$  — соответственно фактические снижения уровня организационной и экономической надежности проекта.

Уравнениями (6)–(9) устанавливаются параметры ОЭН, определяющие отклонения от запланированного риска и величину снижения дохода, а (10) — соответственно величину характеристики ОЭН стадии реализации плана проекта. Идентификация факторов, определяющих эти отклонения, основана на использовании существующих методов ситуационного управления. Величиной ОЭН характеризуется уровень ожидаемых потерь дохода, который может быть повышен за счет мероприятий по корректировке проектных рисков.

Для построения многофакторных моделей используется шаговый регрессионный метод в соответствии с алгоритмом (рисунок).



Алгоритм реализации модели рисков ОЭН формата реализации проекта

Основу алгоритма составляют следующие процедуры «изменения — управление»:

- исходные данные ОЭН формируются на основе базы данных параметров проекта и организационно-экономических форм проекта, приведенных в таблице;

- модели рисков реализации проекта основаны на вычислении корреляционных зависимостей доходов проекта от рисков, определяемых фактическими отклонениями параметров от нормативных;

- планирование реализации проекта основано на разработке классификации ситуаций отклонений и мероприятий по их осуществлению для реализации плана проекта.

Проведенными исследованиями ОЭН инвестиционных проектов на примере объектов жилищного строительства региона установлено следующее [5]:

- изменение организационных параметров продолжительности жизненного цикла в большей степени влияет на результат проекта на его начальных этапах;

- изменение организационных параметров затрат влияет на результаты проекта кумулятивно;

- изменение экономических параметров с учетом влияния внешних факторов влияет дифференцированно на результаты проекта в зависимости от типов ОЭФ проекта;

- изменение экономических параметров с учетом влияния внутренних факторов влияет на результаты проекта через экономические параметры типов организации производства;



**Классификация связей параметров и организационно-экономических форм проекта**

| Тип оценки      | Класс факторов | Тип параметров | ОЭФ <sub>1</sub> |                  |                  | ОЭФ <sub>2</sub> |                  |                  | ОЭФ <sub>3</sub> |                  |                  |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                 |                |                | Φ <sub>1.1</sub> | Φ <sub>1.2</sub> | Φ <sub>1.3</sub> | Φ <sub>2.1</sub> | Φ <sub>2.2</sub> | Φ <sub>2.3</sub> | Φ <sub>3.1</sub> | Φ <sub>3.2</sub> | Φ <sub>3.3</sub> |
| Экономические   | Внешние        | О              |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | Ц              |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | И              | +                | +                | +                | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | И <sub>ф</sub> | +                | +                | +                |                  |                  |                  | +                | +                | +                |
|                 | Внутренние     | З <sub>м</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | З <sub>п</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | А <sub>м</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | З <sub>и</sub> | +                |                  | +                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| Организационные | Внешние        | t <sub>и</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | t <sub>п</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | t <sub>с</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | t <sub>э</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                | +                | +                | +                |
|                 | Внутренние     | З <sub>м</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | З <sub>п</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | З <sub>с</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                |                  |                  |                  |
|                 |                | З <sub>э</sub> |                  |                  |                  | +                | +                | +                | +                | +                | +                |

Примечание. Организационно-экономические формы (ОЭФ) проекта: Φ<sub>1.1</sub> — заем инвестиций; Φ<sub>1.2</sub> — реинвестиции; Φ<sub>1.3</sub> — финансовые инвестиции; Φ<sub>2.1</sub> — непрерывное однопродуктовое производство; Φ<sub>2.2</sub> — непрерывное многопродуктовое производство; Φ<sub>2.3</sub> — прерывное многопродуктовое производство; Φ<sub>3.1</sub> — продажа объекта; Φ<sub>3.2</sub> — аренда объекта; Φ<sub>3.3</sub> — лизинг объекта.

— ОЭН реализации проекта имеет дискретные области эффективности, которые должны классифицироваться в зависимости от ситуаций по областям эффективности проекта с распределением оценок по центрам ответственности: владельцы, группа управления проектом, исполнители.

Основная задача разработки инструмента управления отклонениями — обеспечение процессов регулирования параметров информацией о критических сочетаниях параметров в классах ситуаций, приводящих проект в неэффективное состояние. Особенностью такого подхода является формирование заранее подготовленной информации о долгосрочных оценках ожидаемых рисков и оперативном регулировании их в реальном времени осуществления проекта.

Проектирование ситуаций основано на расчете аналитической модели для различных сочетаний факторов риска в пределах принятых параметров проекта.

Зоны организационно-экономической безопасности (ОЭБ) формируются для трех областей группировки ситуаций по уровням экономической оценки проекта: З<sub>п</sub> — предельная зона, со значением дохода, равного нулю; З<sub>к</sub> — критическая зона, со значением дохода менее нуля; З<sub>д</sub> — зона допустимых значений, со значением дохода выше предельного уровня.

Модель областей ОЭБ имеет вид:

$$З_{д} : \bar{Д} \geq 0, H < 1, Д > 0; \quad (11)$$

$$З_{п} : \bar{Д} > 0, H < 1, Д = 0; \quad (12)$$

$$З_{к} : \bar{Д} < 0, H \leq 1, Д \leq 0. \quad (13)$$

Дифференциация зон может осуществляться по организационной структуре исполнителей, по этапам жизненного цикла проекта и по структуре элементов дохода.

Управляющие мероприятия регулирования формируются на основе программирования действий, в которых фиксируются информационные связи менеджеров и ресурсов в проектном потоке, обеспечивающем реализацию решений по управлению рисками проекта [6].

**Выводы.** Организационно-экономическая надежность строительных проектов является интегрированным критерием ожидаемых потерь результатов на всем протяжении жизненного цикла проекта, которые вычисляются на этапе планирования и корректируются в процессе управления реализацией проекта.

Основными параметрами оценки организационно-экономической надежности являются ресурсоемкость в экономической сфере и интенсивность использования ресурсов в организационной. Интегрирующим параметром служит объем работ, а регулируемыми — ресурсы и время. Критерии оценки на стадии планирования проекта — уровень надежности, соответствующий принятому сценарию ожидаемых факторов риска, а на стадии реализации — уровень надежности с минимальными отклонениями от планового уровня, достигаемый методами и инструментами управления.

Методом интеграции экономических и организационных решений на стадии планирования проекта является интегрированный балансовый метод, а на стадии реализации проекта — метод имитационного моделирования, которым обеспечивается регулирование параметров. Для управления реализацией проекта могут быть использованы положения, приведенные в методике использования областей организационно-экономической безопасности проектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительства / А. А. Гусаков, Н. И. Ильин. — М.: Стройиздат, 1984. — 169 с.
2. Герасимов В. В. Интегрированное проектирование объектов жилищного строительства / В. В. Герасимов, Л. С. Минина. — Новосибирск: НГАСУ, 2001. — 213 с.
3. Лабути́н Е. С. Экономические механизмы многопроектного программирования регионального жилищно-коммунального хозяйства / Е. С. Лабути́н // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. — Пенза: ПГУ, 2007. — С. 57–61.
4. Лабути́н Е. С. Инновационный механизм управления строительных проектов / Е. С. Лабути́н // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: 8-я Междунар. науч.-практ. конф. — Пенза: ПГУ, 2007. — С. 67–69.
5. Герасимов В. В. Управление проектами развития регионального строительного комплекса / В. В. Герасимов, Е. А. Саломатин, Э. В. Круглова // Управление в социальных и экономических системах: Сб. ст. 4-й Междунар. научно-практ. конф. — Пенза: ГУАС, 2006. — С. 54–58.
6. Герасимов В. В. Зарубежные информационные технологии государственного управления / В. В. Герасимов, В. В. Пичугин, А. Н. Исаков. — Новосибирск: НГАУ, 2007. — 213 с.

© Герасимов В. В., Лабути́н Е. С., Пятых Н. В., Михальченко О. Ю., 2008

Получено 17.02.08

**А. В. ЛУБЯГИН**, ген. директор НПО «Фундамент» (г. Новосибирск), **В. К. ФЕДОРОВ**, канд. техн. наук (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

## **К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВЫСОКОНАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ**

Рассматриваются специфические особенности среды инъецированного основания, представляющей собой техногенный геокомпозит с резко выраженной пространственной неравномерностью распределения свойств, и формулируются необходимые условия при оценке свойств среды, позволяющие учесть эти особенности. На основании классических подходов современной геотехники при оценке степени неоднородности среды и ее связей с областью внешнего воздействия анализируются возможности использования традиционных методов исследования свойств и показывается несостоятельность большинства из них в применении к изучаемой среде. Излагается методика определения показателей свойств среды инъецированных оснований, применяемая в НПО «Фундамент», и основные направления ее дальнейшего совершенствования. Акцент делается на определение показателей деформируемости среды.

Со стороны ряда специалистов геотехнического профиля выражается недоверие к надежности рассматриваемого метода, которое базируется на результатах контроля его эффективности с использованием традиционных методик исследования физико-механических свойств грунтов. В то же время рассматриваемый метод обладает рядом несомненных достоинств по сравнению с традиционными методами улучшения строительных свойств грунтов оснований и обладает достаточной степенью надежности при условии выполнения всех технологических требований при его реализации. Что же касается критики метода, основанной на традиционных способах исследования физико-механических свойств грунтов, ниже покажем, что по отношению к среде уплотненного рассматриваемым методом массива эти методы не могут дать объективных данных в связи с рядом особенностей изучаемой среды, которые не учитываются традиционными методиками. Обоснование данного положения и является основной целью настоящей работы. Детальный анализ попыток разработки методик контроля качества инъецированных оснований, а также назначения расчетных характеристик среды на стадии проектирования оставляем за рамками рассмотрения. Отметим только, что на данном этапе созданию таких методик, обладающих высокой степенью надежности, препятствует явный недостаток экспериментальных данных.

**1. Основные принципиальные положения метода.** Метод запатентован в 1998 г. Авторы патента — А. В. Лубягин (ген. директор ООО НПО «Фундамент») и проф. В. С. Миронов (НГАСУ). В последующий период ряд патентов, связанных с технологическими особенностями метода, а также оборудованием для его реализации, были получены ООО НПО «Фундамент». Необходимо отметить, что эти патентуемые положения были, прежде всего, направлены на обеспечение надежности метода.

Метод основан на принципе разрушения исходной структуры грунта с последующим его уплотнением за счет инъецирования в массив под высоким давлением глинопесчаного раствора с незначительной добавкой цемента, выполняющего роль пластификатора.

Раствор инъецируется в уплотняемый массив грунта через инъекторы специальной конструкции, погружаемые в грунт на нужную глубину и располагающимися в плане по сетке с определенным шагом. Предварительно с использованием этого же метода в пределах проектной зоны уплотнения создается контур, предотвращающий выход инъецируемого раствора за пределы проектной зоны. После этого проводится инъецирование внутреннего объема контура, начиная с нижнего горизонта зоны уплотнения с постепенным переходом к верхней (контактной) зоне основания. С целью исключения прорывов раствора на поверхность уплотняемого массива в контактной зоне ее инъецирование проводится после выполнения фундаментных конструкций, играющих роль «пригруза» и позволяющих обеспечивать нужную величину рабочего давления инъецирования. Такая методика используется НПО «Фундамент». Другими организациями, использующими рассматриваемый метод, предлагается с той же целью устройство горизонтального экрана в контактной зоне фундаментов [8].

На стадии обоснования метода и начальном этапе его практического применения предполагалось, что повышение показателей механических свойств среды инъецированного массива происходит только за счет формирования уплотненных зон при действии избыточного давления инъецируемого раствора. При дальнейшем практическом использовании метода выяснилось, что при гидратации цементной добавки в массиве образуются фрагменты затвердевшего раствора различной формы и размеров с явно более высокими показателями механических свойств по сравнению даже с уплотненными зонами.

**2. Особенности среды уплотненного массива.** Массив является явно выраженной *композиционной средой*. Остановимся более подробно на некоторых ее характеристиках.

2.1. Резкие различия в показателях физических и механических свойств в различных зонах. Неоднородность среды, прежде всего, определяется наличием фрагментов затвердевшего раствора, модуль деформации которых на порядок больше, чем в уплотненных зонах [8]. При этом пространственное расположение, форма, размеры уплотненных зон и фрагментов затвердевшего раствора определяются природной неоднородностью исходных грунтов. Это придает им статистический характер и исключает возможность надежного прогнозирования на стадии проектирования.

2.2. Сложная картина «наведенного» напряженного состояния в массиве основания за счет высоких значений избыточных давлений инъецируемого раствора, значительно превышающих бытовые напряжения. К сожалению, экспериментальных данных по комплексному исследованию напряженно-деформированного состояния инъецируемого массива при групповом расположении инъекторов до настоящего времени нет. Можно только с достаточной степенью вероятности предполагать, что в относительно «ослабленных» природных зонах основания, куда прежде всего проникает инъецируемый раствор, релаксация избыточных напряжений проявляется максимально и результирующее остаточное давление может быть незначительным. Но вне таких «ослабленных» зон и, прежде всего, в зонах внедряемого раствора остаточные («наведенные») напряжения могут составлять значительную долю от величины избыточного давления внедряемого раствора и превышать бытовые напряжения. Таким образом, напряженно-деформированное состояние инъецированного массива, которое следует считать исходным на момент приложения нагрузки от сооружения, значительно изменяется по

отношению к природному состоянию и не поддается строгому количественному прогнозу.

2.3. Особенности уплотненного массива, отмеченные в п. 2.1 и 2.2 и являющиеся следствием неизбежной неоднородности природных грунтов, приводят к тому, что любая характеристика среды уплотненного основания, используемая на стадии проектирования, при оценке всех форм взаимодействия основания и здания (сооружения), должна иметь среднестатистическое значение, надежно отражающее все вышеуказанные виды неоднородности уплотненного массива.

2.4. Все существующие нормы, регламентирующие порядок инженерно-геологических изысканий, и методики определения физико-механических свойств грунтов оснований устанавливают правила исследований применительно к основному составляющему объему массива грунта в пределах сжимаемой зоны основания — «инженерно-геологическому элементу» (ИГЭ). Критерии выделения ИГЭ определяются требованиями [4]. Совершенно очевидно, что в силу вышеотмеченных особенностей грунтового массива, уплотненного высоконапорной инъекцией, он не является ИГЭ с точки зрения указанных критериев классификации.

### **3. Необходимые условия при оценке свойств среды инъецированного массива и возможности использования традиционных методов исследований.**

3.1. Определение показателей свойств среды инъецированного массива, и прежде всего модуля деформации, предполагает рассмотрение этой среды как *квазиизотропной* в последующих расчетах деформаций основания. Таким образом, мы сталкиваемся с необходимостью оценки степени неоднородности реальной среды массива и методами ее учета при определении любых показателей свойств. В соответствии с классическим подходом [7, 9] понятие неоднородности грунтовой среды носит относительный характер и непосредственно связано с определенным соотношением между степенью неоднородности («уровень неоднородности») и размерами фрагментов среды, принятых при испытаниях с целью определения той или иной характеристики («определяющая область эксперимента»). Только при определенном соотношении указанных факторов искомая характеристика может получить надежное статистическое значение, иметь интегральный характер, позволяющий рассматривать среду как квазиоднородную. На рисунке приведена известная диаграмма М. В. Раца [7, 9], на которой «уровни неоднородности» и «определяющие области эксперимента» подразделяются в зависимости от их линейных размеров. Поле диаграммы делится на три зоны, определяющие возможность получения надежного статистического значения определяемой характеристики среды и рассмотрения ее как квазиоднородной. Неоднократные вскрытия инъецированных массивов контрольными шурфами, проведенными в НПО «Фундамент» и другими исследователями, показывают, что линейные размеры зон явно выраженной неоднородности (фрагменты затвердевшего раствора и зоны уплотненного грунта между ними) находятся в основном в диапазоне 1–100 см. На диаграмме это соответствует II уровню неоднородности. Из чего следует, что зона *ультранеоднородности*, не препятствующей рассмотрению среды в качестве *квазиоднородной*, соответствует только I категории области воздействия, при которой рассматривается в целом воздействие сооружения на грунтовой массив. Иначе говоря, любые показатели свойств среды могут определяться «откликом» (или реакцией) всего массива на внешнее воздействие от сооружения. Пример такого «отклика» применительно к модулю деформации — фактическая осадка основания. Испытания непосредственно в массиве — штампы, грунтовые целики и призмы, испытания моделей фундаментов (II уровень области воздействия с линейными размерами в диапазо-



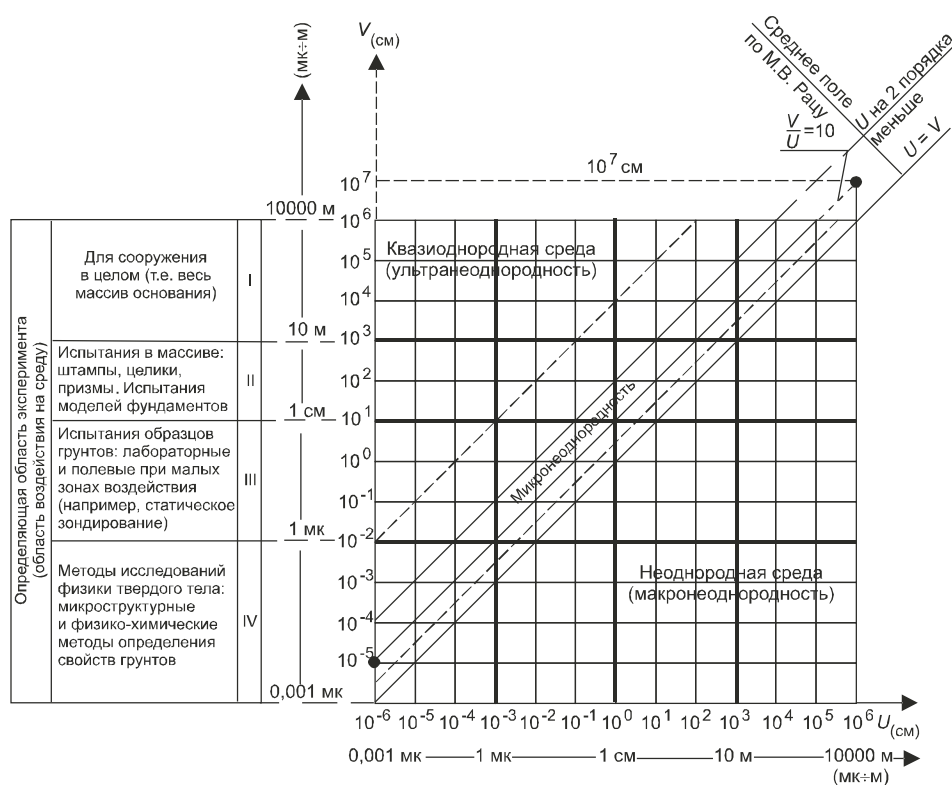


Диаграмма М. В. Раца

| Уровень неоднородности   |  |   |  |
|--|--|---|--|
| I  | II   | III   | IV   |
| Уровень кристаллической решетки минералов (понятия физики твердого тела) | Неоднородности состава и структуры: различия химического и минерального состава, гранулометрического состава, неоднородности порового цемента и пор, наличие микро трещин... | Неоднородности структуры и состава в пределах слоя: переслаивание пород разного состава, макротрещиноватость, мелкие тектонические дислокации | Наличие различных по составу, структуре, текстуре горизонтов, тектонические разрывы, зоны выветривания |

не 0,1–10 м) в основном попадают в зону *микронеоднородности*, для которой характерен высокий статистический разброс определяемых характеристик, диктуемый высокой степенью неоднородности среды. Из этого следует, что для обеспечения требуемой доверительной вероятности при определении характеристик среды необходимо проведение очень большого количества испытаний, что практически недостижимо с учетом технологических особенностей рассматриваемого метода, указанных в разд. 1. И, наконец, при использовании методов определения характеристик среды на лабораторных образцах или полевых методов с незначительной зоной контакта испытательной установки с изучаемой средой, например, метод зондирования (III уровень области воздействия с линейными размерами в диапазоне 10 мк — 0,1 м), попадаем в зону *макронеоднородности*, при которой показатели любого свойства среды меняются при переходе от одной области к другой или проявляются в виде резкого «выброса» характеристик. Таким образом, при использовании указанных методов определения характеристик среды получить достоверный результат, имеющий интегральный характер для всего массива, невозможно.

3.2. При исследовании физико-механических свойств любых материалов существует необходимое и очевидное требование, состоящее в том, что условия и состояние материала при испытаниях должны макси-

мально полно соответствовать тем условиям и параметрам состояния, которые имеют место при работе материала в несущей конструкции. Это состояние в условиях испытаний должно быть смоделировано с максимально возможной полнотой (исходное состояние материала). В число параметров исходного состояния входит и напряженное состояние, которое для грунтовой среды имеет исключительно важное значение, так как она обладает повышенной «чувствительностью» показателей механических свойств к изменениям характера и интенсивности напряженного состояния. В силу особенностей инъектированной среды, отмеченных в разд. 2.2, напряженное состояние основания после инъектирования существенно отличается от природного и не поддается строгому численному прогнозу. Это исключает возможность его моделирования при использовании лабораторных методов исследований свойств грунтов и лишает их необходимой надежности. Принимая во внимание технологические особенности метода инъектирования, учет исходного напряженного состояния встречает труднопреодолимые препятствия и при использовании полевых методов определения модуля деформации.

3.3. На основании вышеизложенного можно констатировать, что лабораторные методы определения модуля деформации композитной среды массива, уплотненного способом высоконапорной инъекции, непригодны как методы контроля качества уплотнения. Полевые методы исследований встречают серьезные препятствия и в лучшем случае могут дать результат только с очень грубым приближением.

3.4. Анализ вышеизложенного материала приводит к выводу, что методы контроля качества уплотнения в рассматриваемом случае, способные привести к объективным результатам, должны отвечать трем основным требованиям:

- базироваться на абсолютно надежных критериях, безусловно подтверждающих надежность всех расчетных параметров уплотненного массива и, прежде всего, значения модуля деформации среды;

- в случае использования косвенных характеристик для оценки качества уплотнения они должны иметь среднестатистический (интегральный) характер, учитывающий все виды неоднородности композитной среды уплотненного массива;

- все параметры исходного состояния уплотненного массива при испытаниях должны быть максимально сохранены.

3.5. В случае использования в роли критериев качества уплотнения косвенных характеристик среды они должны удовлетворять указанным требованиям и находиться в корреляционной связи с модулем деформации, значения которого закладываются на стадии проектирования. Базироваться эти корреляционные связи должны на соответствии расчетных и фактически наблюдаемых деформациях основания. Естественно, что для надежного установления указанных корреляционных связей необходим достаточный материал по данным наблюдений за деформациями зданий и сооружений в различных исходных инженерно-геологических условиях.

3.6. Очевидно, что обсуждаемая проблема делится на два этапа:

- назначение надежных значений расчетных характеристик геокompозитной среды, в том числе и модуля деформаций, на стадии проектирования;

- послеоперационный контроль качества уплотнения и подтверждение обоснованности принятых значений характеристик.

**4. Контроль качества уплотнения инъектируемых оснований, применяемый в опыте работы ООО НПО «Фундамент».** К настоящему моменту ООО НПО «Фундамент» имеет значительный опыт применения рассматриваемого метода уплотнения грунтов оснований, а также

устройства с использованием этого метода противифльтрационных завес, на ряде объектов г. Новосибирска, Алтая, Кузбасса, Санкт-Петербурга, Калининграда, европейской части РФ. Всего к настоящему моменту выполнено свыше 200 объектов. Контрольным показателем плотности на стадии проектирования в соответствии с рекомендациями норм проектирования [2] принимается плотность сухого грунта ( $\rho_d$ ). При предварительном оконтуривании уплотняемой зоны основания, известном объеме инъецируемого раствора внутри контура и его (раствора) фазового состава можно определить среднее значение ( $\rho_d$ ) в уплотненном массиве, которое закладывается в рабочем проекте уплотнения. Таким образом, контрольным показателем является объем фактически инъецируемого в массив раствора, обеспечивающий требуемое значение  $\rho_d$ . Переход от  $\rho_d$  к модулю деформации уплотненного массива на стадии проектирования осуществляется с использованием корреляционных зависимостей между этими параметрами, имеющимися в справочной литературе.

Безусловными достоинствами этой методики является то, что заложенный в основу оценки качества уплотнения параметр  $\rho_d$  действительно носит интегральный характер, учитывая все виды неоднородности среды массива. Недостатками указанной методики на данном этапе являются два обстоятельства. Во-первых, используемые корреляционные зависимости между  $\rho_d$  и модулем деформации, имеющиеся в справочной литературе, базируются на традиционных способах уплотнения грунтов, отличных от рассматриваемого метода. Во-вторых, чрезвычайно низкая деформируемость фрагментов затвердевшего раствора, по сравнению с грунтом между ними, непосредственно не может быть учтена. Она учитывается лишь косвенным образом за счет повышенных значений  $\rho_d$ . При указанной методике назначения этого параметра его величина явно будет находиться между значениями  $\rho_d$  для зон уплотненного грунта и фрагментами затвердевшего раствора. Безусловно, указанная методика нуждается в совершенствовании и такая работа в НПО «Фундамент» ведется по мере накопления данных за фактическими деформациями инъецированных оснований, которые являются абсолютно надежным критерием обоснованности расчетных характеристик, принятых на стадии проектирования.

Наиболее сложным вопросом остается послеоперационный контроль качества уплотнения инъецированных оснований. С учетом не только опыта работы НПО «Фундамент», но и других исследований в этом направлении проблема надежных методов контроля пока не решена. Основной причиной этого является явный дефицит экспериментальных данных, получение которых связано с труднопреодолимыми препятствиями. Следует признать, что на данном этапе абсолютной надежностью обладает только метод геодезического мониторинга за фактическими деформациями основания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений.
2. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты.
3. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
4. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
6. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства.
7. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов/М. Н. Гольдштейн.— М., 1973.
8. Осипов В. И. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомполит»/В. И. Осипов, С. Д. Филимонов//Основания, фундаменты и механика грунтов.— 2002.— № 5.— С. 15–21.

9. Рац М. В. Структурные модели в инженерной геологии / М. В. Рац. — М., 1973.  
10. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян. — М., 2005.

© **Лубягин А. В., Федоров В. К., 2008**

Получено после доработки 06.12.07

*От редакции. Отмечая несомненную актуальность постановки обсуждаемых в статье вопросов, редакция считает, что их решение неизбежно связано с серьезными экспериментальными и теоретическими исследованиями процессов, происходящих в грунте при улучшении его свойств методом высоконапорной инъекции.*

## **В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ**

**УДК 624.014.072.2**

**Б. Н. ВАСЮТА**, канд. техн. наук, доц. (Научно-исследовательское проектно-строительное предприятие «РЕКОН», г. Новосибирск);  
**Г. В. ЧАЛКОВ**, инж. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК НА ОСНОВЕ ПРОКАТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ МЕСТНОМ КРУЧЕНИИ ВЕРХНЕГО ПОЯСА**

#### **Сообщение 1**

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния верхней зоны стенки моделей подкрановых балок из прокатных двутавров, с поясами из тавров и сварных при местном кручении верхнего пояса. Проведены оценка отклонений от нормативных толщин фасонного и листового проката и анализ переходных зон прокатных и сварных профилей. Экспериментально исследована зависимость максимальных напряжений  $\sigma_{fy}$  от шага поперечных ребер жесткости во всем возможном диапазоне его изменения, а также их зависимость в безреберном случае от геометрических характеристик пояса и стенки. Экспериментально подтверждена возможность использования для расчета на местный изгиб стенки подкрановой балки универсальной расчетной модели в виде условного цилиндрического изгиба.

В связи с экономическим ростом в России на предприятиях, эксплуатирующих мостовые краны с интенсивным режимом работы, возникает необходимость замены подкрановых балок (ПБ), исчерпавших циклический ресурс. Известно, что семейством решений, обеспечивающим повышенный ресурс, являются ПБ на основе прокатных профилей: двутавров и тавров [1–5 и др.]. Исследователи неоднократно отмечали, что в верхней зоне стенки (ВЗС) прокатных двутавров и тавров напряжения от местного кручения  $\sigma_{fy}$  ниже, чем в сварных при равных номинальных (проектных) габаритах сечений пояса и стенки. Однако отсутствует убедительная экспериментальная и теоретическая аргументация этих фактов. Ограниченность приведенных выше исследований состоит в том, что недостаточно подробно исследована работа балок при местном кручении во всем возможном диапазоне изменения шага поперечных ребер жесткости. Кроме этого отсутствует экспериментально-теоретическое обоснование факторов, обуславливающих меньшую нагруженность ВЗС прокатных профилей по сравнению со сварными. Соответственно не снят вопрос: нужно ли разделять методики определения напряжений от местного кручения для балок

сварных и прокатных? По этой причине отсутствует инженерная расчетная методика, учитывающая влияние вышеупомянутых факторов.

В 2005–2006 гг. в лаборатории строительных конструкций НГАСУ (Сибстрин) авторами настоящей статьи проводились комплексные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния наиболее перспективных конструктивных форм подкрановых балок на основе прокатных профилей. Целью исследований являлось экспериментальное изучение особенностей напряженно-деформированного состояния ВЗС конструктивных форм подкрановых балок на основе прокатных профилей во всем возможном диапазоне изменения шага поперечных ребер жесткости. На основе экспериментального изучения моделей проведены уточнение теоретической расчетной модели и проверка ее адекватности, а также разработана универсальная инженерная методика определения компонент напряжений от местного кручения в ВЗС. Комплекс экспериментальных исследований включал изучение особенностей напряженно-деформированного состояния ВЗС моделей при нагружениях, моделирующих полный спектр крановых воздействий.

В настоящем сообщении 1 представлены результаты экспериментальных исследований при первом виде нагружения — сосредоточенным крутящим моментом. Необходимо отметить, что нагружение верхнего пояса сосредоточенным крутящим моментом эксплуатируемых натурных подкрановых балок «в чистом виде» невозможно. Однако этот вид нагружения признан необходимым в качестве первого этапа комплексных исследований для того, чтобы иметь возможность в более явном виде выделить влияние факторов, обуславливающих более низкую нагруженность ВЗС прокатных профилей и исследовать работу элементов системы «пояс–стенка–ребро» без погрешностей, вносимых особенностями взаимодействия элементов системы «колесо — рельс — пояс».

**Задачи и методика эксперимента. Описание моделей.** На этапе экспериментальных исследований при нагружении местным крутящим моментом для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Проведен анализ и выявлен характер зависимости предельных значений максимальных напряжений  $\sigma_{fy,u}$  от геометрических параметров поперечного сечения моделей балок в безреберном случае.

2. Исследован характер зависимости максимальных напряжений  $\sigma_{fy}$  от шага промежуточных поперечных ребер жесткости во всем возможном диапазоне его изменения: от частого расположения ( $a = 300$  мм) до безреберного случая ( $a = l$ ), при различных соотношениях крутильной жесткости пояса и цилиндрической жесткости стенки.

3. Исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние ВЗС особенностей крепления ребер жесткости к основному сечению балки.

4. Исследовано поддерживающее влияние тормозной конструкции на напряженно-деформированное состояние ВЗС при местном кручении верхнего пояса.

5. Выделены и экспериментально исследованы основные факторы, обуславливающие снижение местных напряжений в ВЗС прокатных профилей в сравнении со сварными (при равных номинальных размерах пояса и стенки):

- выкружки прокатного двутавра (тавра);
- фактических отклонений толщин элементов сечения от номинальных значений.

Кроме вышеприведенных задач в процессе обработки и анализа экспериментальных данных были поставлены и решены ряд расчетно-теоретических задач. Во-первых, расчетным методом оценено влияние выкружки прокатного профиля на геометрические характеристики пояса (момент инерции при вертикальном изгибе и при чистом кручении).



Во-вторых, теоретически исследовано распределение компонент напряжений от местного кручения по высоте ВЗС. В результате получено аппроксимирующее выражение для описания изменения по высоте стенки главного компонента напряжений  $\sigma_{fy}$ , а также выражение для коэффициента, позволяющего проводить корректировку экспериментальных значений напряжений для определения их значений в расчетном сечении. В-третьих, теоретически получено выражение для определения эффективной высоты сечения двутавровой балки с переменной толщиной стенки  $h_{ef, w}$  для вычисления «характеристики распределения» стенки  $L$ . Последняя характеристика используется в выражении для определения теоретических напряжений  $\sigma_{fy}$ . В-четвертых, для оценки влияния фактических отклонений толщин элементов от номинальных значений проведены детальные измерения и анализ фактических толщин сечений моделей.

Для испытаний были запроектированы и изготовлены в промышленных условиях шесть моделей подкрановых балок трех конструктивных форм (рис. 1, а):

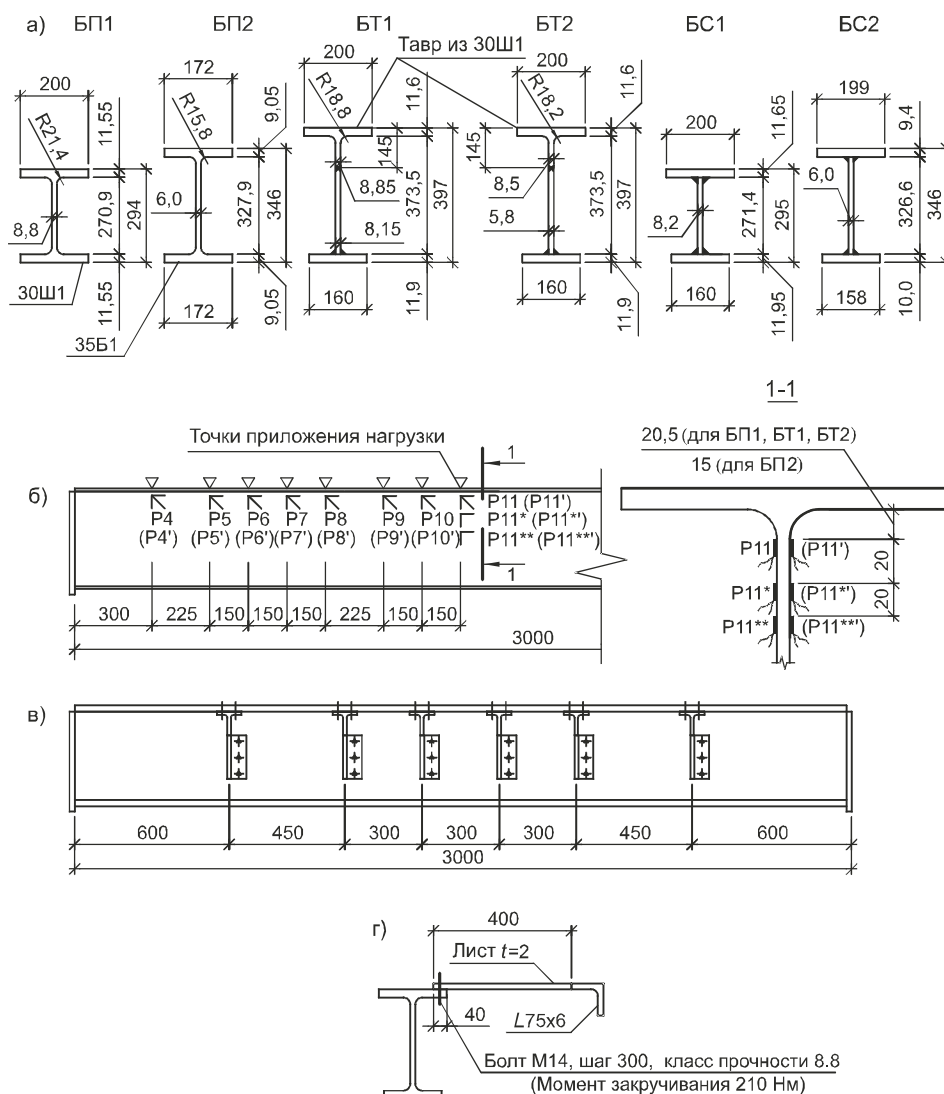


Рис. 1. Экспериментальные модели подкрановых балок

а — размеры поперечных сечений (среднестатистические по результатам замеров); б — размещение розеток тензорезисторов; в — схема расположения ребер жесткости; г — тормозная конструкция

— из прокатных двутавров: БП1 из прокатного широкополочного двутавра 30Ш1 и БП2 из прокатного балочного двутавра 35Б1 по СТО АСЧМ 20–93; сталь С245 по ГОСТу 27772-88\*;

— с верхним поясом из широкополочных тавров, изготовленных путем роспуска широкополочного двутавра 30Ш1 по СТО АСЧМ 20–93: БТ1 с номинальной толщиной стенки-вставки  $t_w = 8,0$  мм, равной номинальной толщине стенки поясного тавра; в модели БТ2 толщина стенки вставки уменьшена до  $t_w = 6,0$  мм, при сохранении общей высоты стенки; номинальная высота сечения модели БТ1 превышала высоту модели БП1 в 1,53 раза;

— в виде сварного двутавра, используемых в качестве моделей-эталонов: БС1 и БС2; номинальные (проектные) геометрические размеры пояса и стенки модели БС1 соответствовали номинальным размерам модели БП1 (по СТО АСЧМ 20-93); номинальные размеры элементов сечения модели БС2 были близки номинальным размерам модели БП2.

Все модели имели длину 3000 мм, опорные ребра выполнялись из листа 10 200. Значения условной гибкости стенки для всех моделей не превышали 2,2 единицы. При этом в соответствии с [6] не требуется укреплять стенку промежуточными ребрами жесткости. Таким образом, промежуточные ребра жесткости с креплением к основному сечению при помощи болтов применены в качестве элементов, разгружающих ВЗС от действия местного крутящего момента. В стенках моделей балок были предусмотрены отверстия для крепления съемных ребер жесткости при помощи болтов М12 класса прочности 8.8 с предварительным натяжением  $M_s = 110$  Нм (рис. 1, в). Болты М8 затягивались «от руки». Установкой ребер в различных комбинациях по длине моделей получен широкий ряд значений длины отсеков стенки: 300, 450, 600, 900, 1050, 1350, 1650, 1950, 1800, 2400 и 3000 мм.

**Анализ отклонений фактических толщин сечений моделей от номинальных значений.** Одним из факторов, обеспечивающих более низкую нагруженность ВЗС прокатных профилей, необходимо считать отклонение фактических толщин элементов сечения относительно номинальных размеров в большую сторону. Для изучения этого фактора перед испытаниями было проведено измерение фактических толщин листового и фасонного проката элементов сечений моделей. Измерения проводились с использованием ультразвукового толщиномера А1207 с погрешностью измерений  $\pm (0,005t + 0,1 \text{ мм})$  с дублированием измерений штангенциркулем (точность 0,05 мм). Определение фактического радиуса выкружки делалось по слепкам. Обмер слепков выполнялся с точностью 0,1 мм. Взятие слепков производилось с шагом 300 мм вдоль верхней кромки моделей БП1, БП2, БТ1, БТ2 с двух сторон стенки. На рис. 1, а приведены средние значения радиусов выкружки, полученные по результатам статистической обработки данных обмеров.

Анализ результатов измерений показал следующее. Толщины листового проката, составляющего сечения сварных моделей, соответствуют требованиям ГОСТа 19903-74: все значения замеров находились в пределах стандартных допусков; коэффициент вариации значений измерений не превышал 3%; среднестатистические значения толщин отличались от номинальных. Причем фактические (средние) толщины поясов сварных моделей отличались от номинальных в меньшую, а стенок в большую сторону. Так, фактическая (средняя) толщина листа с номинальной толщиной 6,0 мм составляла 6,15 мм.

Принципиально иные результаты показали замеры толщин прокатных двутавров и тавров. На рис. 2 представлены результаты замеров толщин элементов поперечных сечений прокатных двутавров моделей в середине пролета. Видно, что стенка в поперечном сечении имеет форму

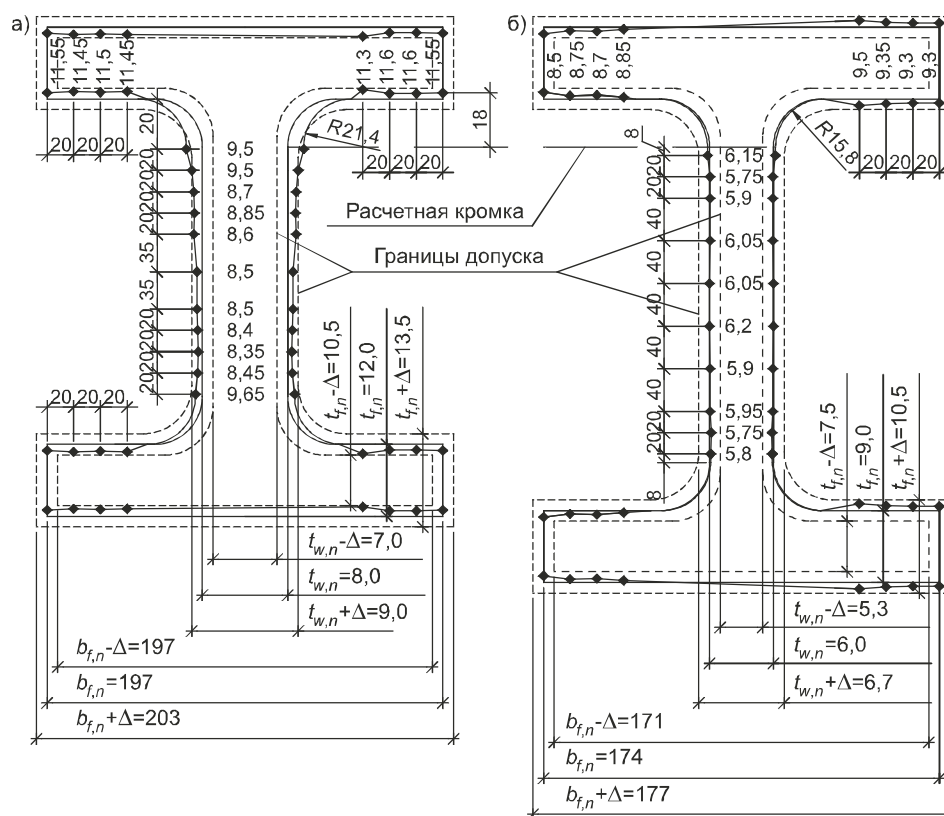


Рис. 2. Фактические толщины поясов и стенки прокатных двутавров экспериментальных моделей в середине пролета

а — БП1 (двутавр 30Ш1); б — БП2 (двутавр 35Б1); — — контур по границам допуска; — фактический контур сечения; — номинальный (проектный) контур сечения

галтели с увеличением толщины при приближении к выкружке. Значения толщины стенки в месте перехода к выкружке превышают верхнюю границу допуска на 1,5–11%. При этом превышение относительно номинальной толщины достигает 25%. Величина отклонения значений радиуса выкружки от номинального не регламентируется стандартами. Фактический радиус выкружки в прокатном профиле 30Ш1 (модели БП1, БТ1, БТ2) при номинальном значении 18,0 мм принимал значение от 18,0 до 27,5 мм, т.е. был не менее номинального. У прокатного профиля 35Б1 фактический радиус принимал значения от 13 до 25,5 мм при номинальном 14 мм. Для значений радиуса выкружки прокатных двутавров получено наибольшее значение коэффициента вариации — 13%. Отклонения толщин поясов прокатных профилей не превышали предельно допустимых значений.

**Анализ особенностей переходных зон в сварных и прокатных профилях.** При проведении расчетов прочности и выносливости ВЗС подкрановых балок используют понятие «расчетная кромка». Установлено [1], что расчетная кромка в ВЗС сварных балок расположена в горизонтальном сечении, проходящем по границе перехода металла поясного шва к основному металлу стенки (рис. 3). В прокатном профиле расчетная кромка ВЗС расположена в горизонтальном сечении по границе выкружки и стенки [1, 2]. Сравнивая геометрические параметры зоны перехода от пояса к стенке сварного и прокатного профилей, необходимо отметить два аспекта. Во-первых, существует значительная разница расстояния от нижней кромки пояса до расчетной кромки  $h_p$ ; в общем случае в экспериментальных сварных моделях  $h_p = 4–7$  мм; в эксперименталь-

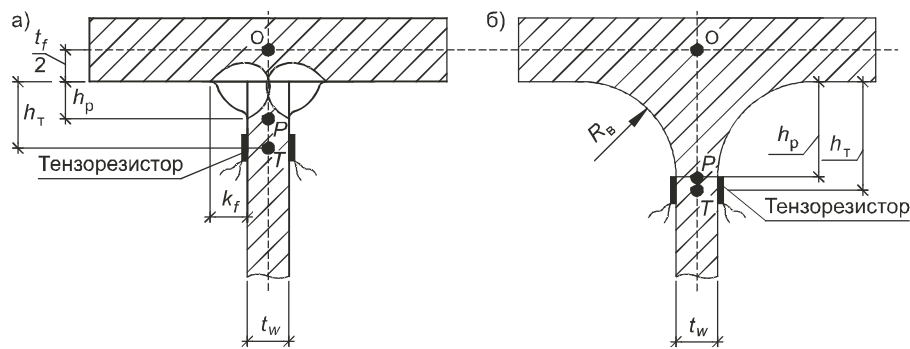


Рис. 3. Особенности переходных зон от пояса к стенке в сварных (а) и в прокатных (б) профилях

ных прокатных при номинальных размерах выкружки  $h_p = 13\text{--}22$  мм; при отклонениях геометрических параметров прокатных моделей  $h_p$  достигает значений 27–28 мм. В эксплуатируемых сварных балках этот размер составляет 8–16 мм, а в прокатных 16–30 мм и более при возможных отклонениях радиуса выкружки в большую сторону.

Во-вторых, фактические размеры тензорезисторов (база 5 мм, длина подложки 10 мм) не позволяют размещать их геометрический центр непосредственно на уровне расчетной кромки стенки (точка  $P$  на рис. 3) как в сварных, так и в прокатных моделях. Таким образом, при экспериментальных исследованиях регистрируются деформации в сечении, расположенном несколько ниже расчетной кромки стенки. В зависимости от размеров тензорезистора центр датчика размещается на 5–9 мм ниже расчетной кромки. Для определения деформаций и напряжений в расчетном сечении необходима корректировка экспериментальных данных, определенных в точке наклейки тензорезистора. Для проведения такой корректировки необходимо знать закон изменения компонент местных напряжений по высоте стенки. Для этого с использованием метода перемещений и решений теории упругости в одинарных тригонометрических рядах [7] был установлен закон изменения напряжений  $\sigma_{fy}$  по высоте стенки для безреберного случая. Аппроксимацией результатов серии вычислений была установлена зависимость:

$$\sigma_{fy}^{(y)} = \sigma_{fy} \cdot \eta_y, \quad (1)$$

где  $\sigma_{fy}$  — напряжения в расчетной кромке;

$\sigma_{fy}^{(y)}$  — напряжения на расстоянии  $y$  от расчетной кромки.

$$\eta_y = e^{\frac{0,3y}{L^{0,42}}}, \quad (2)$$

$$L = \sqrt{\frac{I_{t,f} \cdot h_w}{t_w^3}}, \quad (3)$$

где  $L$  — характеристика распределения сечения балки (в формуле (2)  $y$  и  $L$  в см). Как будет показано позже, полученная зависимость достаточно успешно описывает и результаты эксперимента и в дальнейшем использована при обработке экспериментальных данных. В экспериментальных сварных моделях  $y = 8$  мм и корректирующий коэффициент для этих моделей составляет  $\eta_y = 0,936$ .

Известно, что изгибные напряжения в тонких пластинках (например, в стенке моделей балок) весьма «чувствительны» к изменению значений ее толщины. Поэтому при обработке экспериментальных данных необходимо

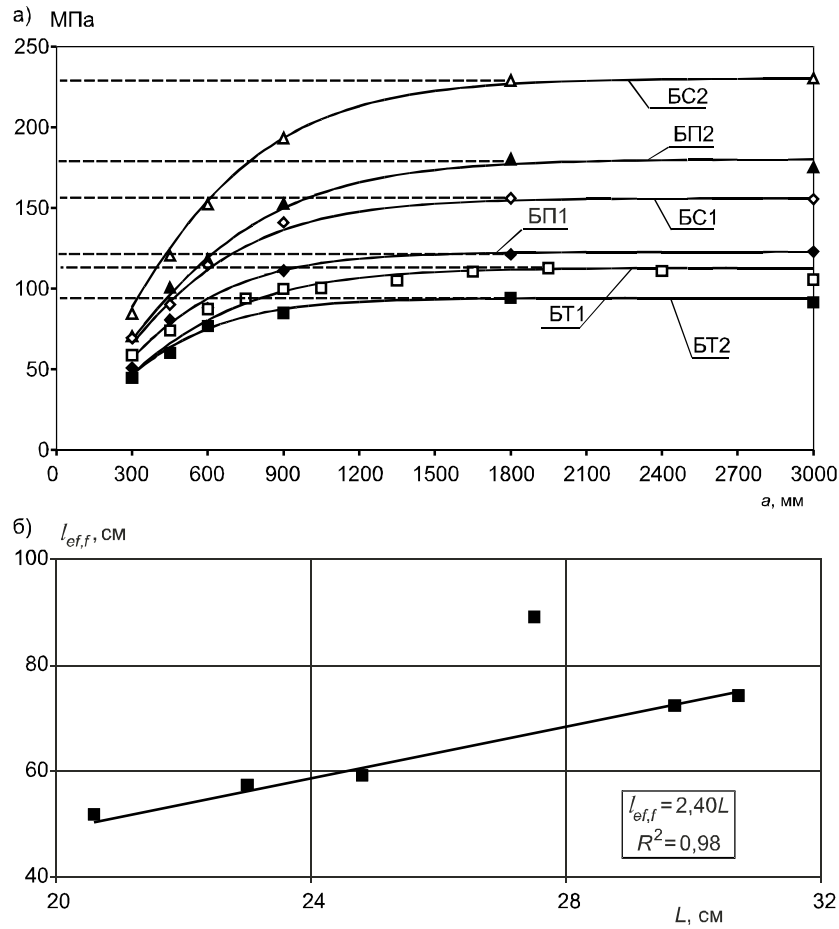
учесть еще один аспект. Поверхность прокатных профилей в месте перехода стенки к выкружке имеет неровный рельеф. Для обеспечения качественной наклейки тензорезисторов необходима шлифовка поверхности. В результате подготовки поверхности толщина стенки в месте наклейки тензорезисторов несколько меньше «нетронутой» толщины стенки на этом уровне кромки. Локальное уменьшение толщины стенки вносит погрешности в результаты тензометрирования. Предполагая распределение изгибных напряжений по толщине стенки по закону плоских сечений, эту погрешность предлагается учесть введением корректирующего коэффициента  $\eta_t = t_{w,i} / t_{w,p}$ , где  $t_{w,i}$  — толщина стенки в месте наклейки тензорезистора после обработки поверхности;  $t_{w,i}$  — толщина стенки на уровне наклейки тензорезисторов. Таким образом, корректировка экспериментальных значений напряжений для расчетной кромки ВЗС проводилась по формуле

$$\sigma_{fy}^{(y)} = \sigma_{fy} \cdot \eta_y \cdot \eta_t. \quad (4)$$

**Особенности напряженно-деформированного состояния верхней зоны стенки в безреберном случае загрузки. Анализ предельных напряжений  $\sigma_{fy,u}$ .** Безреберный случай загрузки авторы рассматривают как базовый, позволяющий изучить характер взаимодействия пояса и стенки при местном кручении пояса в «чистом» виде без «вмешательства» в работу ребер жесткости. Результаты настоящего эксперимента в целом подтвердили характер распределения компонент напряжений по длине ВЗС безреберных моделей, описанный в работе [8]. Подробнее остановимся на сравнительном анализе максимальных значений главного компонента напряжений  $\sigma_{fy}$  в шести исследованных моделях. В сводной таблице и на рис. 4, а представлены зависимости экспериментальных максимальных значений напряжений  $\sigma_{fy}$  в ВЗС в середине отсеков от расстояния между ребрами жесткости во всем исследуемом диапазоне изменения. Приведены экспериментальные значения напряжений при сосредоточенном моменте  $M_t = 10000$  кг·см, скорректированные для расчетной кромки по формуле (4). Затухающий характер зависимости  $\sigma_{fy}$  от шага ребер прослеживается для всех моделей балок. При возрастании шага ребер до определенной величины напряжения от местного кручения достигают своего предельного значения и более не возрастают:  $\sigma_{fy} = \text{const} = \sigma_{fy,u}$ . Математически экспериментальная зависимость напряжений от шага ребер может описываться функцией, изменяющейся по закону гиперболического тангенса  $\sigma_{fy} = \sigma_{fy,u} \cdot \text{th}(f(a))$ , что подтверждает корректность ранее полученных теоретических результатов [9].

Экспериментальные данные свидетельствуют, что напряжения  $\sigma_{fy}$  достигают предельного значения уже при  $a = 1800$  мм. В этом случае балка работает по схеме безреберной: ребра не участвуют в восприятии крутящего момента — весь момент, приложенный к полке, воспринимается только стенкой. В 4 моделях при  $a = 1800$  мм напряжения  $\sigma_{fy}$  были даже несколько (на 0,4–6,8%) выше, чем при  $a = 3000$  мм. Это можно объяснить разбросом экспериментальных данных.

Видно, что предельные напряжения  $\sigma_{fy,u}$  в прокатных моделях существенно ниже, чем в сварных аналогах: в прокатной модели БП1 по сравнению со сварной БС1 они ниже на 21%, а в модели БП2 по сравнению с БС2 на 24%. Показательные выводы позволяет сделать сравнение результатов испытаний моделей с одинаковыми характеристиками ВЗС и пояса, но разными характеристиками стенки: БП1, БТ1, БТ2. В модели БТ1 с более высокой стенкой предельные напряжения  $\sigma_{fy,u}$  снизились на 14% по сравнению с БП1. В модели БТ2, имеющей более тонкую стенку-вставку по сравнению с БТ1, предельные напряжения снизились еще



а — зависимость экспериментальных напряжений  $\sigma_{fy}^3$  от расстояния между ребрами жесткости (--- уровень предельных напряжений  $\sigma_{fy,u}^3$ ; — аппроксимирующая кривая по зависимости  $\sigma_{fy} = \sigma_{fy,u} \cdot \text{th}(\mu_a \cdot a / l_{ef,f})$ ); б — зависимость экспериментального значения условной длины распределения крутящего момента  $l_{ef,f}$  от характеристики распределения  $L$ ; точка со значением  $l_{ef,f} = 86,6$  исключена из обработки

на 14%. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают общий характер взаимодействия элементов системы пояс — стенка: чем ниже «погонная» (по высоте сечения) цилиндрическая жесткость стенки (при равной крутильной жесткости пояса), тем ниже предельные напряжения  $\sigma_{fy,u}$ .

Этот характер взаимодействия теоретически можно описать с использованием расчетной модели местного изгиба стенки балки в виде условного цилиндрического изгиба [9]. В этом случае выражение для наибольших (предельных) напряжений на уровне расчетной кромки в безреберной балке записывается в виде

$$\sigma_{fy,u} = \frac{M_t}{W_{ef,f}} = \frac{6M_t}{t_w^2} \frac{1}{l_{ef,f}}, \quad (5)$$

где  $W_{ef,f} = \frac{l_{ef,f} t_w^2}{6}$  — условный момент сопротивления стенки балки на

уровне расчетной кромки;

$l_{ef,f}$  — условная длина распределения местного крутящего момента в стенке балки на уровне расчетной кромки.



**Сводная таблица экспериментальных показателей**

| Модель | Шаг<br>ребер,<br>мм | $t_{w,cp}$ ,<br>мм | $h_w$ ,<br>мм | $I_{t,f}$ ,<br>см <sup>4</sup> | $L$ ,<br>см | $\sigma_{fy}^{(y)}$ ,<br>МПа | $y$   | $t$  | $\sigma_{fy}^{\exists}$ ,<br>МПа | $l_{ef,f}^{\exists}$ ,<br>см | $c_{\exists}$ |
|--------|---------------------|--------------------|---------------|--------------------------------|-------------|------------------------------|-------|------|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| БП1    | 300                 | 9,7                | 228           | 17,02                          | 20,6        | 43,3                         | 0,98  | 0,87 | 50,8                             | 51,9                         | 2,52          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 68,7                         |       | 0,87 | 80,6                             |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 73,7                         |       | 0,87 | 86,4                             |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 94,7                         |       | 0,87 | 111,1                            |                              |               |
|        | 1800                |                    |               |                                |             | 103,3                        |       | 0,87 | 121,2                            |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 104,7                        |       | 0,87 | 122,8                            |                              |               |
| БП2    | 300                 | 6,2                | 296           | 6,10                           | 27,5        | 68,7                         | 0,985 | 0,99 | 70,5                             | 86,6                         | 3,15          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 98,1                         |       | 0,99 | 100,6                            |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 114,9                        |       | 0,99 | 117,8                            |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 148,7                        |       | 0,99 | 152,5                            |                              |               |
|        | 1800                |                    |               |                                |             | 175,7                        |       | 0,99 | 180,2                            |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 170,8                        |       | 0,99 | 175,2                            |                              |               |
| БТ1    | 300                 | 9,8                | 376*          | 15,44                          | 24,8        | 54,7                         | 0,97  | 0,96 | 58,7                             | 55,4                         | 2,23          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 69,1                         |       | 0,96 | 74,2                             |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 81,3                         |       | 0,96 | 87,3                             |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 93,0                         |       | 0,96 | 99,9                             |                              |               |
|        | 1350                |                    |               |                                |             | 97,9                         |       | 0,96 | 105,1                            |                              |               |
|        | 1950                |                    |               |                                |             | 105,0                        |       | 0,96 | 112,8                            |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 98,3                         |       | 0,96 | 105,6                            |                              |               |
| БТ2    | 300                 | 9,4                | 522*          | 14,96                          | 30,7        | 42,2                         | 0,97  | 0,98 | 44,6                             | 72,5                         | 2,36          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 56,8                         |       | 0,98 | 60,1                             |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 72,7                         |       | 0,98 | 76,9                             |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 80,4                         |       | 0,98 | 85,0                             |                              |               |
|        | 1800                |                    |               |                                |             | 89,1                         |       | 0,98 | 96,7                             |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 86,4                         |       | 0,98 | 90,9                             |                              |               |
| БС1    | 300                 | 8,2                | 257           | 11,34                          | 23,0        | 62,0                         | 0,94  | 0,96 | 68,7                             | 57,8                         | 2,51          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 80,4                         |       | 0,96 | 89,1                             |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 102,3                        |       | 0,96 | 113,4                            |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 125,9                        |       | 0,96 | 139,5                            |                              |               |
|        | 1800                |                    |               |                                |             | 139,3                        |       | 0,96 | 154,4                            |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 138,8                        |       | 0,96 | 153,8                            |                              |               |
| БС2    | 300                 | 6,0                | 313           | 6,08                           | 29,7        | 79,4                         | 0,94  | 1,00 | 84,5                             | 72,4                         | 2,44          |
|        | 450                 |                    |               |                                |             | 113,1                        |       | 1,00 | 120,3                            |                              |               |
|        | 600                 |                    |               |                                |             | 143,2                        |       | 1,00 | 152,3                            |                              |               |
|        | 900                 |                    |               |                                |             | 181,6                        |       | 1,00 | 193,2                            |                              |               |
|        | 1800                |                    |               |                                |             | 215,2                        |       | 1,00 | 228,9                            |                              |               |
|        | 3000                |                    |               |                                |             | 216,5                        |       | 1,00 | 230,3                            |                              |               |

\* Приведены значения фиктивной высоты стенки. В рамке максимальные значения предельных напряжений  $\sigma_{fy,u}^{\exists}$ .

В работах [9, 10] на основе теоретического решения и серии расчетов МКЭ показано, что условная длина распределения  $l_{ef,f}$  прямо пропорциональна характеристике распределения:

$$l_{ef,f} = c \cdot L = c \sqrt{\frac{I_{t,f} \cdot h_w}{t_w^3}}, \quad (6)$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности.

Понятие «характеристика распределения» введено в работе [9] и отражает «распределительные» качества пояса и стенки и количественно зависит от отношения жесткости на кручение пояса к «погонной» цилиндрической жесткости стенки. Чем выше значение  $L$ , тем на большую длину стенки распределяется местный крутящий момент, приложенный к поясу.

Для принятой теоретической модели характеристика распределения  $L$  и коэффициент  $c$  являются базовыми показателями. В работе [9] на основе приближенного теоретического решения значение коэффициента  $c = 2,11$ . Используя вышеприведенные зависимости, можно установить экспериментальное значение условной длины распределения крутящего момента на уровне расчетной кромки:

$$l_{ef,f}^3 = \frac{6M_t}{\sigma_{fy,u}^3 t_w^2}, \quad (7)$$

и экспериментальное значение коэффициента  $c$ :

$$c_3 = \frac{l_{ef,f}^3}{L}. \quad (8)$$

В запас получаемых результатов в качестве предельных напряжений  $\sigma_{fy,u}^3$  в формуле (7) было принято максимальное из зафиксированных экспериментальных значений.

На рис. 4, б показана зависимость экспериментальных значений условной длины распределения от характеристики распределения  $L$ , а в таблице приведены значения  $c$ , полученные на основе экспериментальных данных по формуле (8). При определении  $l_{ef,f}^3$  в формуле (6) значения толщины стенки принимались по результатам обмеров кромки на уровне наклейки тензорезисторов, а характеристика распределения  $L$  определялась с учетом фактических толщин пояса с учетом выкружки и использованием фиктивной высоты стенки для моделей с поясами из тавров:

$$h_{fic} = \xi h_w, \quad \xi = \beta((1-\beta)^2 + (1-\beta) + 1) + \frac{(1-\beta)^3}{\alpha}, \quad (9)$$

где  $\beta = \frac{h_{w,t}}{h_w}$ ;  $\alpha = \left( \frac{t_{w,b}}{t_{w,t}} \right)^3$ , здесь  $h_{w,t}$ ,  $t_{w,t}$  — высота и толщина стенки поясного тавра;

$t_{w,b}$  — толщина стенки-вставки.

Видно, что практически для всех моделей значения условной длины распределения хорошо «укладываются» на одну прямую  $l_{ef,f} = 2,40L$ , а значения коэффициента  $c$  находятся в диапазоне от 2,23 до 2,52. Исключение из этого ряда составила модель БП2 ( $c = 3,15$ ), что можно объяснить погрешностями эксперимента и из дальнейшей обработки исключить как выброс. Таким образом, полученные данные эксперимента свидетельствуют об универсальности принятой расчетной модели, а именно о возможности ее использования для определения напряжений от кручения во всех исследуемых конструктивных формах подкрановых балок: из прокатных двутавров, с поясами из тавров и сварных. Более высокое среднее значение экспериментального коэффициента  $c = 2,40$  по сравнению с теоретическим, полученным в [10], указывает на целесообразность уточнения теоретической расчетной модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горпинченко В. М. Разработка метода расчета на выносливость и создание надежных и эффективных конструкций балок для подвижной нагрузки: Дис. ... д-ра техн. наук/В. М. Горпинченко.— М.: ЦНИИСК, 1983.— 329 с.
2. Нежданов К. К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчета: Дис. ... д-ра техн. наук/К. К. Нежданов.— М.: МИСИ, 1993.— 42 с.
3. Мысак В. В. Особенности расчета и технологии изготовления подкрановых балок с поясами из широкополочных тавров: Дис. ... канд. техн. наук/В. В. Мысак.— М.: МИСИ, 1974.— 1985.— 146 с.
4. Новоселов А. А. Особенности напряженно-деформированного состояния подкрановых балок с верхним поясом из прокатных тавров: Дис. ... канд. техн. наук/А. А. Новоселов.— Новосибирск: СибГУПС, 2005.— 154 с.
5. Васюта Б. Н. О тенденциях и противоречиях развития подкрановых конструкций/Б. Н. Васюта, Г. В. Чалков//Монтажные и специальные работы в строительстве.— 2007.— № 4.
6. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Гострой России.— М.: ФГУП ЦПП, 2004.— 131 с.
7. Александров А. В. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы: Учеб. для вузов/А. В. Александров.— М.: Стройиздат, 1983.
8. Васюта Б. Н. Экспериментальное исследование подкрановой балки со сменной подрельсовой частью при местном кручении/Б. Н. Васюта//Изв. вузов. Строительство.— 2005.— № 3.— С. 12–18.
9. Васюта Б. Н. К вопросу об определении напряжений в стенке от местного кручения пояса балки/Б. Н. Васюта//Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 3–4.— С. 4–11.
10. Васюта Б. Н. Исследование напряжений от местного кручения в стенке безреберной подкрановой балки/Б. Н. Васюта, Г. В. Чалков//Исследования, расчет, проектирование и безопасная эксплуатация строительных конструкций, зданий и сооружений: Тез. докл. науч.-практ. конф., Челябинск, 2005.

© Васюта Б. Н., Чалков Г. В., 2008

Получено после доработки 06.12.07

## УДК 624.131

**А. М. КАРАУЛОВ**, канд. техн. наук, доц., **И. А. СЫДЫКОВА**, инж. (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск);  
**А. А. КУЗНЕЦОВ**, гл. инж. (ОАО «Стройизыскания», г. Новосибирск)

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ЭПЮРЫ ПРЕДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА НА ГЛИНИСТОЕ ОСНОВАНИЕ**

Приведены результаты полевых опытов по определению предельной нагрузки и эпюры предельного давления кольцевых штампов различных размеров на супесчаное основание. Установлены характер эпюры предельного давления и опытная зависимость предельной нагрузки от величины внутреннего радиуса кольца при неизменной его ширине.

Экспериментальным исследованиям несущей способности грунтовых оснований посвящено значительное количество публикаций. Широкой известностью пользуются опыты П. Д. Евдокимова [1], В. Г. Березанцева [2], Ю. Н. Мурзенко [3], А. П. Криворотова [4] и др., посвященные определению предельного давления круглых, квадратных и прямоугольных фундаментов на основание. В опытах Ю. Н. Мурзенко и А. П. Криворотова устанавливалась также форма эпюры предельного давления, что представляет особый интерес, поскольку позволяет судить о трансформации контактного давления по подошве фундамента в процессе увеличения нагрузки. Результаты подобных экспериментов дают возможность обоснованно корректировать теоретические методы определения предельной нагрузки фундаментов на основание.

В настоящее время остается недостаточно выясненным вопрос о предельном давлении кольцевых фундаментов на основание. В то же время кольцевые фундаменты находят достаточно широкое применение для круглых в плане сооружений. Некоторые опыты были проведены на песчаных грунтах в лабораторных условиях с применением штампов малых размеров [5, 6]. Результаты этих опытов показали, что с увеличением внутреннего радиуса кольца среднее давление на песчаное основание имеет сначала тенденцию к увеличению (при малых значениях внутреннего радиуса), а затем уменьшается и стремится к постоянной величине. Указанное увеличение среднего давления при малых внутренних отверстиях кольца связано, по определению В. Г. Федоровского [7], с эффектом непродавливания.

Для дальнейшего изучения характера деформирования основания круглого фундамента необходимо было провести полевые опыты, в том числе на глинистых грунтах, с использованием кольцевых штампов больших размеров. Такие опыты были выполнены, и результаты этих опытов приводятся в данной статье.

Итак, исследовалась несущая способность основания, сложенного супесью, при вдавливании в него специально изготовленных кольцевых штампов различных размеров с площадью подошвы от 707 до 3534 см<sup>2</sup>. В опытах использовались круглый штамп радиусом 15 см и кольцевые штампы с внутренним  $r_v$  и наружным  $r_n$  радиусами следующих размеров:  $r_v = 4$  см и  $r_n = 19$  см,  $r_v = 10$  см и  $r_n = 25$  см,  $r_v = 30$  см и  $r_n = 45$  см. Ширина кольца у всех штампов составляла 15 см.

Полевые эксперименты проводились на строительной площадке по ул. Лежена в г. Новосибирске в октябре 2007 г. В качестве опытного полигона использовалось ровное дно котлована, разработанного для сооружения фундаментной части высотного здания. Сжимаемая толща под штампом была представлена твердой супесью естественного сложения с характеристиками: удельный вес грунта  $\gamma = 17,8 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ , удельное сцепление  $c = 14,6$  кПа и угол внутреннего трения  $\phi = 25,2^\circ$ . Параметры прочности супеси  $c$  и  $\phi$  определялись в консолидированно-дренированных стабилометрических испытаниях. Методика отдельного испытания заключалась в нагружении образца грунта вертикальным давлением вплоть до разрушения при постоянном боковом давлении, т.е. при значении параметра Лоде  $\mu_\sigma = -1$ .

Первая цель опытов заключалась в определении предельной нагрузки  $P_u$  и средней величины предельного давления  $p_u = \frac{P_u}{A}$  ( $A$  — площадь подошвы кольцевого штампа) в зависимости от величины внутреннего радиуса кольца  $r_v$ . Вторая цель опытов заключалась в регистрации эпюры нормальной компоненты предельного давления по ширине кольца.

Опыты проводились с использованием технической базы ОАО «Стройизыскания» г. Новосибирска. Общий вид опытной площадки показан на рис. 1. Испытательный стенд представлял собой сварную металлическую конструкцию (раму) с упорной балкой 1 и площадками 2 для загрузочных плит 3. Кольцевой штамп 4 устанавливался на выровненную площадку с песчаной подготовкой толщиной 2 см. Нагрузка на кольцевой штамп создавалась гидравлическим домкратом ДГ-100. Между домкратом и упорной балкой находился компенсатор. Штамп тщательно притирался к основанию и горизонтальность его положения контролировалась

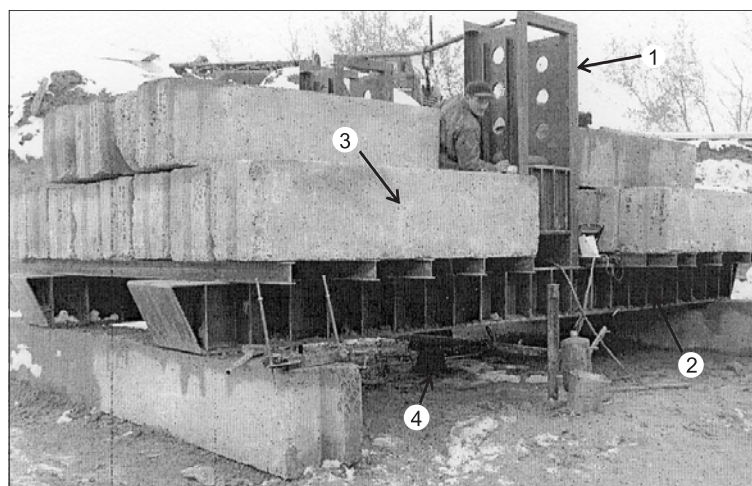


Рис. 1. Общий вид испытательной установки

1 — рама с упорной балкой; 2 — площадка для загрузочных плит; 3 — загрузочные плиты; 4 — кольцевой штамп

уровнем, а центральность приложения нагрузки — отвесом. Вертикальные перемещения штампа регистрировались в трех точках прогибомерами Аистова 6 ПАО ЛИСИ.

Испытания штампа на вдавливание проводились методом релаксации. Нагружение осуществлялось ступенями от 5 до 10 кН в зависимости от размеров штампа и стадии опыта. При приближении к предельной нагрузке величина ступеней уменьшалась до 2 кН. На каждой ступени выдерживалось время условной стабилизации деформаций и соответственно прекращения снижения нагрузки. За предельную нагрузку принималась нагрузка, при которой осадка резко возрастала при неизменном давлении. Для данного основания, представленного твердой супесью, это условие проявлялось достаточно ярко, что позволяло надежно регистрировать величину разрушающей нагрузки. Измерение предельной нагрузки осуществлялось с трехкратной повторяемостью.

На рис. 2 показаны графики зависимости осадки основания  $s$  от нагрузки  $P$ , построенные по осредненным данным. В таблице приведены величины предельного давления опытных штампов различных размеров на супесчаное основание. Как в опытах с кольцевыми штампами на песчаном основании, так и в настоящих полевых исследованиях имеет место снижение среднего предельного давления с увеличением внутреннего радиуса кольца. Эффект увеличения

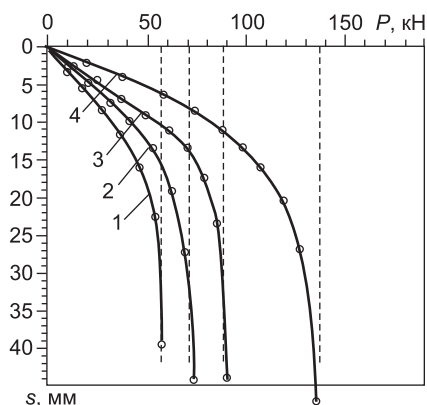


Рис. 2. Графики осадка — нагрузка по результатам опытов

1 — круглый штамп; 2 —  $r_b = 4$  см; 3 —  $r_b = 10$  см; 4 —  $r_b = 30$  см (кольцевые штампы)

Предельные нагрузки на супесчаное основание кольцевых штампов

| $r_b$ ,<br>см | $A$ ,<br>см <sup>2</sup> | $P_{ui}$ , кН |     |     | $P_u$ ,<br>кН | $p_u$ ,<br>кПа |
|---------------|--------------------------|---------------|-----|-----|---------------|----------------|
|               |                          | Опыт          |     |     | Среднее       |                |
|               |                          | 1             | 2   | 3   |               |                |
| 0             | 706,8                    | 53            | 62  | 55  | 57            | 806            |
| 4             | 1084                     | 67            | 72  | 73  | 71            | 654            |
| 10            | 1649                     | 82            | 90  | 96  | 89            | 539            |
| 30            | 3534                     | 132           | 141 | 140 | 138           | 390            |



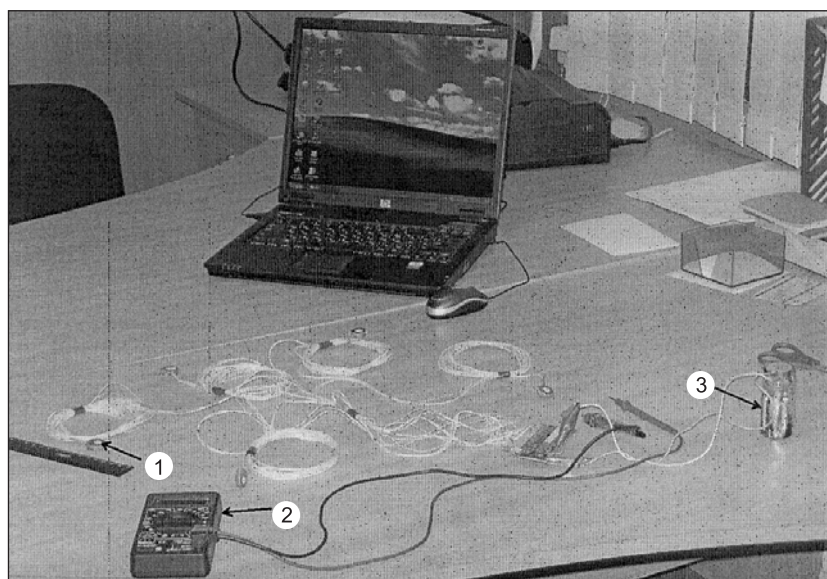


Рис. 3. Аппаратура для измерения нормального давления в грунте  
1 — месдозы; 2 — миллиамперметр; 3 — автономный блок питания

предельного давления при малых внутренних радиусах здесь не был зафиксирован.

Далее, для измерения контактного давления по подошве кольцевых штампов использовались датчики давления — месдозы 1, регистрирующая аппаратура — миллиамперметр 2 и автономный блок питания — батарейки постоянного тока 3 (3 вольта) (рис. 3). Аппаратура для измерения давления была подготовлена и предоставлена для проведения опытов сотрудником НИЛ «Геология, основания и фундаменты, земляное полотно» СГУПС Э. А. Самолетовым.

Месдозы устанавливались непосредственно под подошвой штампа и располагались в радиальном направлении равномерно по ширине кольца. На полке кольца 15 см шириной размещалось пять датчиков давления диаметром 2 см. Между датчиками давления и подошвой штампа была устроена буферная прослойка сухого пылеватого песка толщиной 1 см. Это обеспечивало надежную передачу давления на датчики и соответственно устойчивые результаты измерений. Предварительно месдозы были протарированы в барокамере с учетом температуры и величины напряжения автономного блока питания. Перед нагружением штампов регистрировались начальные показания датчиков.

В результате проведения опытов по вдавливанию кольцевых штампов в грунтовое основание с измерением контактного давления была установлена форма эпюры нормальной компоненты предельного давления. На рис. 4 показаны опытные эпюры предельного давления для кольце-

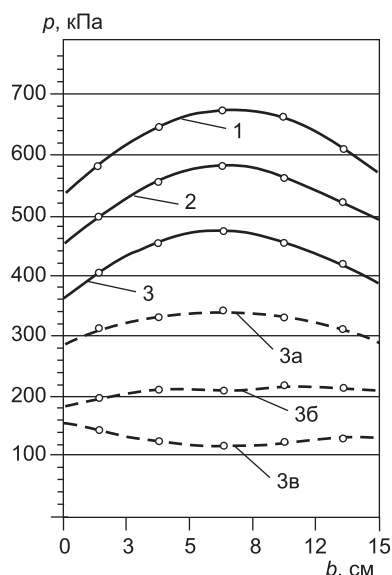


Рис. 4. Опытные эпюры предельного давления кольцевого штампа на основание

1 —  $r_b = 4$  см; 2 —  $r_b = 10$  см; 3 —  $r_b = 30$  см

Трансформация эпюры контактного давления с ростом нагрузки для штампа 3: 3а —  $0,25 p_u$ ; 3б —  $0,5 p_u$ ; 3в —  $0,75 p_u$  ( $p_u$  — предельная нагрузка)



вых штампов различных размеров. Следует отметить, что характер эпюр предельного давления для кольцевого фундамента в радиальном направлении по ширине кольца в принципе повторяет характер аналогичных эпюр для круглого и ленточного фундаментов, полученных для песчаных оснований [3]. Эти эпюры имеют выпуклый характер с максимальным значением в средней части штампа. Предельные нагрузки, рассчитанные по экспериментальным эпюрам, незначительно превышают интегральную величину разрушающей нагрузки, установленной в опыте, что дополнительно подтверждает корректность проведенных измерений. В то же время необходимо заметить, что опыты, проведенные на суглинистых грунтах А. П. Криворотовым, показали иную форму эпюры предельного давления, выпуклость которой имела обратное направление [4]. В этой связи отметим, что полученные здесь данные относятся к опесчаненным супесям, по свойствам приближающимся к пескам.

В качестве примера на рис. 4 показана трансформация эпюры контактного давления в процессе увеличения нагрузки для штампа 3 ( $r_b = 30$  см). Эпюра дана для трех стадий нагружения, составляющих 0,25; 0,5 и 0,75 от предельной нагрузки. На начальном этапе выпуклость эпюры незначительна и лишь с ростом нагрузки ее форма приобретает характер, свойственный предельному давлению.

**Выводы.** 1. Предельная нагрузка кольцевого штампа на супесчаное основание снижается при увеличении внутреннего радиуса кольца при постоянной его ширине и стремится к постоянной величине. В отличие от опытов на песчаных грунтах здесь не было зафиксировано увеличение предельной нагрузки при малом радиусе штампа.

2. Эпюра предельного давления в радиальном сечении по ширине кольца имеет выпуклый характер с максимумом в средней части кольца (для размеров штампов, использованных в опытах).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов П. Д. Устойчивость гидротехнических сооружений и прочность их оснований/П. Д. Евдокимов.— Л.: Энергия, 1966.— 129 с.
2. Березанцев В. Г. Исследование прочности песчаных оснований/В. Г. Березанцев, В. А. Ярошенко, А. Г. Прокопович и др.— М.: Трансжелдориздат, 1958.— 148 с.
3. Мурзенко Ю. Н. Проектирование оснований зданий и сооружений в нелинейной стадии работы/Ю. Н. Мурзенко.— Новочеркасск: НПИ, 1981.— 88 с.
4. Криворотов А. П. Напряженное состояние глинистого грунта в контактном слое под подошвой жесткого полосового штампа/А. П. Криворотов, Л. В. Халтурина//Основания, фундаменты и механика грунтов.— 1991.— № 2.— С. 20–23.
5. Худяков А. В. Опыты с кольцевыми штампами/А. В. Худяков//Расчет и проектирование оснований и фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях.— Воронеж: ВИСИ, 1992.— С. 138–141.
6. Караулов А. М. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности оснований кольцевых фундаментов/А. М. Караулов//Основания, фундаменты и механика грунтов.— 2006.— № 2.— С. 2–4.
7. Федоровский В. Г. Предельное давление на ряд ленточных штампов и эффект непродавливания/В. Г. Федоровский//Основания, фундаменты и механика грунтов.— 2006.— № 6.— С. 9–13.

© Караулов А. М., Сыдыкова И. Л., Кузнецов А. А., 2008

Получено после доработки 28.12.07



4 марта 2008 г. на 79-м году ушел из жизни Валентин Михайлович Хрулев — один из крупнейших ученых в области теории и технологии композиционных строительных материалов, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, действительный член Жилищно-коммунальной академии.

### **ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, ИЗОБРЕТАТЕЛЬ**

В 1953 г., окончив с отличием Новосибирский институт военных инженеров транспорта (НИВИТ), Валентин Михайлович Хрулев начал трудовой путь в должности мастера-строителя, в 1956 г. поступил в аспирантуру ЦНИИСК, в 1959 г. защитил кандидатскую, а в 1968 г. докторскую диссертации по проблеме долговечности клееных строительных конструкций.

С 1959 г. Валентин Михайлович — сотрудник Западно-Сибирского филиала Академии строительства и архитектуры СССР, в 1971–1999 гг. — заведующий кафедрой «Полимерные и теплоизоляционные материалы» НГАСУ. В последние годы он работал профессором кафедры «Строительные материалы и специальные технологии» Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), читал лекции по композиционным материалам студентам, магистрантам и аспирантам. До последних дней жизни В. М. Хрулев поддерживал научные связи с учеными Монголии и бывших республик СССР — Украины, Белоруссии, Латвии, Узбекистана, Казахстана, Киргизии.

Основное направление его научной деятельности — развитие теории и технологии композиционных материалов. По этому направлению им сформирована научная школа, создан комплекс учебных дисциплин для подготовки строителей-технологов современной квалификации, подготовлены 39 кандидатов и 6 докторов технических наук. Среди его учеников министры, руководители крупных предприятий строительной индустрии, руководители вузов, заведующие кафедрами, профессора и доценты.

В списке научных трудов В. М. Хрулева более 850 публикаций, в том числе 89 книг — монографий, учебников, справочников, нормативных изданий по строительству, более 100 изобретений по пионерным технологиям. Эти разработки неоднократно отмечены медалями ВДНХ, грамотами, почетными знаками Минвуза. За использование его изобретений в народном хозяйстве он отмечен нагрудным знаком «Изобретатель СССР».

В. М. Хрулев входил в состав диссертационных советов России и СНГ, был председателем Сибирского Отделения Ассоциации ученых и специалистов в области строительного материаловедения (АУССМ), более 30 лет состоял в редакционном совете Стройиздата, был ответственным редактором, а затем членом редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Строительство». На посту ответственного редактора журнала он способствовал расширению географии научных статей; тираж журнала в этот период достигал 6,5 тыс. экземпляров. В 1998 г. В. М. Хрулев был включен в состав редколлегии журнала оборонной промышленности «Конструкции из композиционных материалов». Тесные связи у него сложились и с издательствами «Высшая школа», «Стройиздат», «Лесная промышленность», где были изданы многие его учебники и монографии.

Валентин Михайлович организовал проведение 28-ми Всесоюзных и Международных конференций, семинаров, симпозиумов, принял участие более чем в 130 научных конференциях. Многие годы он работал в Правлении НТО Стройиндустрии и ВХО им. Д. И. Менделеева по Новосибирской области.

В. М. Хрулев персонифицирован в энциклопедии «Сибирь в лицах» Межрегиональной Ассоциации «Сибирское соглашение» (2001 г.), включен в справочник АУССМ «Кто есть кто в строительном материаловедении» (2003 г.), в 2004 г. избран в состав научного совета РААСН.

Интересы Валентина Михайловича Хрулева не замыкались на науке. Он хорошо знал поэзию, классическую литературу, прекрасно играл на гитаре и пел, был душой любой компании во всех регионах страны. Обладая огромным научным авторитетом, никогда не навязывал своего мнения, одинаково уважительно и внимательно выслушивал и академика, и аспиранта. Последователи и ученики Валентина Михайловича продолжают его научное дело и гордятся таким Учителем.

**МАШКИН Н. А., д-р техн. наук, проф., завкафедрой  
строительных материалов и спецтехнологий**

## **НОВЫЕ НЕСУЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Разработанные конструкции состоят из С-образных профилей (пояса балок) и профилированных листов (стенки). Соединения элементов конструкции выполняются с помощью высокопрочных болтов и самонарезающих винтов. На конструкции получены патенты РФ.



**Конструктивное решение позволяет:**

- перекрывать пролеты от 6 до 18 м;
- возводить здания различного назначения и габаритов в короткие сроки;
- производить изготовление конструкций на стройплощадке;
- обеспечивать экономию металла на покрытие до 40% и снижение стоимости от 15 до 35%;
- не производить антикоррозионную защиту в течение десятков лет.

**Область применения:**

Производственные, складские и сельскохозяйственные здания; здания спортивного, торгового назначения; гаражи и здания техобслуживания транспорта; надстройки (мансарды) существующих жилых домов; одно-, двухэтажные жилые и нежилые здания.

Методика расчета подтверждена в ходе многолетних научных исследований:

- теоретическими разработками, включая численные исследования;
- испытаниями балок с целью изучения особенностей их работы (проведены испытания крупномасштабных моделей балок пролетом 3,2 м и натурной балки пролетом 9 м);
- опытом проектирования, строительства и эксплуатации конструкций.

**Авторы разработок:**

Крылов И.И., канд. техн. наук, проф. (НГАСУ (Сибстрин)),

Кретинин А.Н., ассист. (НГАСУ (Сибстрин)).

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

E-mail: [ntio-ngasu@yandex.ru](mailto:ntio-ngasu@yandex.ru)

Internet: [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru)

Тел./факс: (8-383)-266-28-89

