

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ,  
Е.И. КРУТИКОВ, А.А. КУТУМОВ

## АНАЛИЗ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ПНЕВМОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ВЫПУСКОМ ОТРАБОТАВШЕГО ВОЗДУХА ИЗ КАМЕРЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрены физико-математические описания механизмов бесклапанного типа и приведены функциональные особенности их признаков-элементов в сравнении с синтезированным механизмом.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, трубчатый воздухоподвод, перепускной канал, камера рабочего хода, камера холостого хода, расход воздуха.

**Введение.** В данной статье анализируются краткие описания устройств и работы известных пневмоударных механизмов в объеме их признаков-элементов на основе классификации [1] и приведен синтез механизма с помощью известных признаков-элементов, но в сочетании улучшающих качественные и количественные свойства механизмов.

Характерная группа пневмоударных механизмов позволяет проследить стремление компенсировать недостатки камер атмосферного давления, в которых не осуществляется формирование силового импульса давления воздуха. Основным конструктивным решением, дающим возможность частично компенсировать указанный недостаток, были, как правило, однотипные предложения: пропуск выпускаемого воздуха через камеру атмосферного давления отработавшего, например, в камере холостого хода с давлением 20–30 % от величины сетевого, что позволяло частично компенсировать недостаток и реализовать формирование силового импульса с использованием его в рабочем процессе механизма со стороны камеры противоположного назначения [2–5]. Указанные механизмы приведены в работе [1] в виде принципиальных схем без указаний камер сетевого давления воздуха, поскольку их присутствие подразумевается практически для всех известных механизмов. В механизмах [4–6], рассматриваемых в данной работе, камеры сетевого давления показаны с целью более полного их физико-математического описания.

Известно также исполнение пневмоударного механизма с двухканальной трубкой для впуска и выпуска воздуха из трех камер, две из которых формируют силовой импульс давления со стороны рабочего хода и одна — со стороны холостого хода при применении бесступенчатого ударника с камерой в ударнике [1, 6].

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Кутумов А.А.,  
2014

При более совершенной конструктивной схеме в сравнении с механизмами [2–5] механизм [1, 6] обладает недостатком: каналы перепуска воздуха между камерами размещены как в теле ударника, так и в теле цилиндра, что обуславливает увеличение поперечных размеров и массы пневмоударного механизма, а поэтому использование такой принципиальной схемы не предпочтительно для ручных машин.

Пневмоударный механизм для одноканальных и двухканальных трубок воздухопровода существенно упрощается при применении системы воздухораспределения дроссельного типа для механизмов с бесступенчатым ударником [1, 7]. Для подобных пневмоударных механизмов свойствен непроизводительный расход воздуха из сети при сообщении рабочих камер с атмосферой. Однако указанный недостаток может быть компенсирован увеличением частоты ударов при сохранении энергии единичного удара [8].

Рассмотрим некоторые типовые принципиальные схемы, известные из [1], с целью показа расширенного использования их функциональных возможностей при организации одних и тех же свойств признаков-элементов, но при обеспечении рабочего или холостого ходов ударника. Различные свойства одних и тех же признаков-элементов выступают более отчетливо при анализе физико-математических описаний, где видно, что пневмоударный механизм кардинально изменяет свои функции. Усматривать возможность применения того или иного признака-элемента целесообразно при поиске новых технических решений пневмоударных механизмов.

В уравнениях физико-математических описаний для площадей каналов впуска  $\omega_i$ , каналов выпуска  $\omega_{ai}$  и каналов перетечек  $\psi_i$  для упрощения расчетов и неопределенности конструктивного исполнения признаков-элементов коэффициенты расходов воздуха приняты равными единице. После выполнения конструктивного решения пневмоударного механизма значения  $\omega_i$ ,  $\omega_{ai}$  и  $\psi_i$  должны уточняться расчетом, например, по методике [9] или определяться опытным путем для конкретной конструкции.

**Пневмоударный механизм** [4] (рис. 1). Работа механизма осуществляется следующим образом.

Сжатый воздух, после включения устройства впуска, поступает по каналу А с проходным сечением  $\omega_A$  в камеру Б сетевого воздуха с объемом  $V_B$ , далее по каналу В с проходным сечением  $\omega_B$  в трубке 1 массой  $m_T$  в распределительную камеру Г в ударнике 2 с объемом  $V_\Gamma$ , откуда в зави-

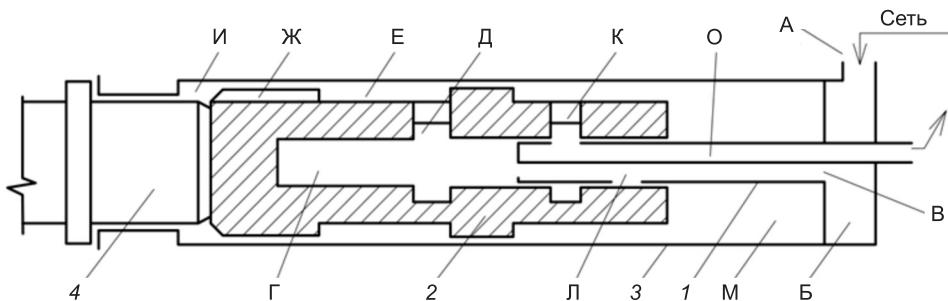


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоударного механизма

симости от положения ударника по радиальному каналу  $\Delta$  с проходным сечением  $\omega_{\Delta}$  в выточку Е на ударнике с объемом  $V_E$  с диаметральным зазором с проходным сечением  $\omega_E$  относительно цилиндра З массой  $m_k$  и далее по наружному пазу Ж ударника с проходным сечением ( $\omega_J < \omega_E > \omega_{\Delta}$ ) в управляемую камеру И с объемом  $V_I$  или частично при совмещении впускных каналов К в ударнике и Л в трубке с проходными сечениями ( $\omega_B > \omega_K > \omega_L$ ) — в кольцевую камеру М пневматического буфера с объемом  $V_M$  в цилиндре.

Опорожнение камер И и М происходит попеременно через камеры И — через паз Ж, выточку Е при совмещении канала  $\Delta$  с выпускным каналом О в трубке проходным сечением  $\omega_O$ , далее камеры М непосредственно через каналы  $\Delta$  и О.

Под действием разницы силовых импульсов со стороны камер Г, И и М ударник совершают возвратно-поступательное движение и наносит удар по хвостовику инструмента 4.

Существенный недостаток механизма [4]: применение в качестве воздухоподвода (впуска) и воздухоотвода (выпуска) двухканальной трубыки, что приводит к увеличению поперечных размеров трубыки, ударника, цилиндра.

Введем обозначения:  $\varphi_i$ ,  $\Omega_i$  — бародинамические и термодинамические функции с индексами, соответствующими обозначениям камер, каналов, представленных на рис. 1;  $\omega_i$ ,  $\omega_{ai}$  — проходные площади сечений каналов впуска и каналов выпуска;  $k$  — показатель процесса;  $W = (2kR/(k-1))^{1/2}$ ;  $k_y$ ,  $k_k$  — коэффициент отскока ударника от хвостовика и корпуса от буртика хвостовика;  $S_t$ ,  $S_y$ ,  $S_u$  — диаметральные сечения трубыки, ударника и цилиндра;  $p_i$ ,  $\theta_i$  — давление и температура в рабочих камерах и каналах соответствуют их обозначениям;  $x_y$ ,  $x_k$  — перемещение ударника и корпуса;  $F_{hi}$  — усилие нажатия на корпус цилиндра;

$\left( \frac{dx_y}{dt} \right)_0$ ,  $\left( \frac{dx_k}{dt} \right)_0$  — скорость отскока ударника и корпуса цилиндра;  $\left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y$ ,  $\left( \frac{dx_k}{dt} \right)_y$  — скорости соударения ударника и корпуса цилиндра с хвостовиком и буртиком хвостовика.

### Физико-математическое описание механизма [4].

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_B / dt = k / V_B [W(\omega_A \varphi_A - \omega_B(x_y) \varphi_B)], \\ dp_G / dt = k / (V_G - x_y S_G) [W(\omega_B(x_y) \varphi_B - \omega_D(x_y) \varphi_D + \omega_L(x_y) \varphi_L - \omega_K(x_y) \varphi_K) + p_G(dx_y / dt) S_G], \\ dp_E / dt = k / V_E [W(\omega_D(x_y) \varphi_D - \omega_J \varphi_J)], \\ dp_I / dt = k / (V_I + x_y S_I) [W(\omega_J \varphi_J - \omega_{ao}(x_y) \varphi_{ao}) - p_I(dx_y / dt) S_I], \\ dp_M / dt = k / (V_M - x_y S_M) [W(\omega_L(x_y) \varphi_L + \omega_G(x_y) \varphi_G - \omega_{ao}(x_y) \varphi_{ao}) + p_M(dx_y / dt) S_M]. \end{cases} \quad (1)$$

## Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2x_y/dt^2 = [p_I S_I - p_\Gamma S_\Gamma - p_M S_M]/m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y/dt)_o = -k_y(dx_y/dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2x_k/dt^2 = [p_I S_I - p_\Gamma S_\Gamma - p_M S_M - F_H]/m_k & \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k/dt)_o = -k_k(dx_k/dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

В (2)  $S_\Gamma$ ,  $S_M$ ,  $S_i$  — рабочие площади ударника со стороны распределительной камеры, камер рабочего и холостого ходов;  $m_u = m_k + m_t$ .

## Термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{aligned} d\theta_B/dt &= \theta_B / (p_B V_B) [W(\omega_A \varphi_A \Omega_A - \omega_B(x_y) \varphi_B \Omega_B)], \\ d\theta_\Gamma/dt &= \theta_\Gamma / (p_\Gamma (V_\Gamma - x_y S_\Gamma)) [W(\omega_B(x_y) \varphi_B \Omega_B - \omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D + \\ &+ \omega_L(x_y) \varphi_L \Omega_L - \omega_K(x_y) \varphi_K \Omega_K) + (k-1)p_\Gamma(dx_y/dt)S_\Gamma], \\ d\theta_E/dt &= \theta_E / (p_E V_E) [W(\omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D - \omega_K \varphi_K \Omega_K)], \\ d\theta_I/dt &= \theta_I / (p_I (V_I + x_y S_I)) [W(\omega_K \varphi_K \Omega_K - \omega_{ao}(x_y) \varphi_{ao} \Omega_{ao}) - \\ &- (k-1)p_I(dx_y/dt)S_I], \\ d\theta_M/dt &= \theta_M / (p_M (V_M - x_y S_M)) [W(\omega_L(x_y) \varphi_L \Omega_L + \omega_\Gamma(x_y) \varphi_\Gamma \Omega_\Gamma - \\ &- \omega_{ao}(x_y) \varphi_{ao} \Omega_{ao}) + (k-1)p_M(dx_y/dt)S_M]. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Б (1), (2) и (3)  $S_M = S_U - S_\Gamma$ ,  $S_U = S_y = S_{\Pi}$ ,  $S_\Gamma = S_T$ .

При предварительном моделировании уравнения системы (3) можно опустить.

В (1)–(3) не учтены перетечки между камерами, а в (2) — силы трения между контактирующими парами: трубка — ударник, ударник — цилиндр, которые необходимы при более точных расчетах при моделировании рабочего процесса.

**Пневматический механизм** [5] (рис. 2). Работа механизма осуществляется следующим образом.

Сжатый воздух, после включения устройства впуска, поступает по каналу А с проходным сечением  $\omega_A$  в камеру Б сетевого воздуха с объемом  $V_B$ , далее по каналу В с проходным сечением  $\omega_B$  в камеру Г объемом  $V_\Gamma$  в цилиндре 1 массой  $m_k$ , затем по каналу Д с проходным сечением  $\omega_D$  в виде лыски на трубке 2 массой  $m_t$ , по каналу Е с проходным сечением

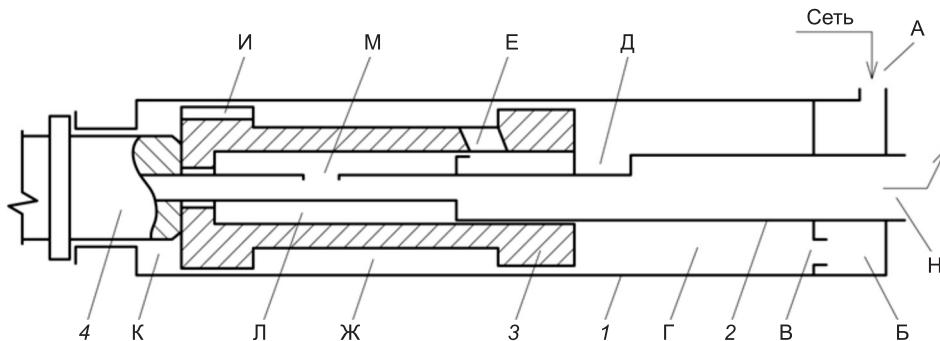


Рис. 2. Принципиальная схема пневмоударного механизма со ступенчатой трубкой

$\omega_E$  в ударнике З массой  $m_y$  в проточку Ж с кольцевым объемом  $V_\Gamma = \text{const}$  и канал-паз И с проходным сечением  $\omega_I < \omega_J < \omega_E < \omega_D$  в камеру К с объемом  $V_K$ . Камера Л с объемом  $V_L$  пневматического буфера периодически сообщается с атмосферой через канал М с проходным сечением  $m_M$  и центральный канал Н с проходным сечением  $m_{AH} \gg m_{AM}$ . Опорожнение камеры  $V_K$  происходит периодически через каналы М и Н.

Под действием разницы силовых импульсов со стороны камер К, Л и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удар по хвостовику инструмента 4.

#### Физико-математическое описание механизма [5].

Основные обозначения и их физический смысл принят аналогичным (1)–(3) в соответствии с обозначениями на рис. 2.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_B / dt = k / V_B [W(\omega_A \varphi_A - \omega_B \varphi_B)], \\ dp_\Gamma / dt = k / (V_\Gamma - x_y S_\Gamma) [W(\omega_B \varphi_B - \omega_D(x_y) \varphi_D) + \\ + p_p (dx_y / dt) S_p], \\ dp_J / dt = k / V_J [W(\omega_D(x_y) \varphi_D - \omega_I \varphi_I)], \\ dp_K / dt = k / (V_K + x_y S_K) [W(\omega_I \varphi_I - \omega_{AM}(x_y) \varphi_{AM}) - \\ - p_x (dx_y / dt) S_x], \\ dp_L / dt = k / (V_L - x_y S_L) [W(\omega_{AH} \varphi_{AH} + \omega_{AM}(x_y) \varphi_{AM}) + \\ + p_L (dx_y / dt) S_L]. \end{cases} \quad (4)$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2 x_y / dt^2 = (p_K S_K - p_L S_L - p_\Gamma S_\Gamma) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y / dt)_o = -k_y (dx_y / dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2 x_k / dt^2 = (p_K S_K - p_L S_L - p_\Gamma S_\Gamma - F_H) / m_k & \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k / dt)_o = -k_k (dx_k / dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} d\theta_B / dt = \theta_B / (p_B V_B) [W(\omega_A \varphi_A \Omega_A - \omega_B \varphi_B \Omega_B)], \\ d\theta_\Gamma / dt = \theta_\Gamma / (p_\Gamma (V_\Gamma - x_y S_\Gamma)) [W(\omega_B \varphi_B \Omega_B - \omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D) + \\ + (k-1)p_\Gamma (dx_y / dt) S_\Gamma], \\ d\theta_J / dt = \theta_J / (p_J V_J) [W(\omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D - \omega_I \varphi_I \Omega_I)], \\ d\theta_K / dt = \theta_K / (p_K (V_K + x_y S_K)) [W(\omega_I \varphi_I \Omega_I - \omega_{AM}(x_y) \varphi_{AM} \Omega_{AM}) - \\ - (k-1)p_K (dx_y / dt) S_K], \\ d\theta_L / dt = \theta_L / (p_L (V_L - x_y S_L)) [W(\omega_{AH} \varphi_{AH} \Omega_{AH} + \omega_{AM}(x_y) \varphi_{AM} \Omega_{AM}) + \\ + (k-1)p_L (dx_y / dt) S_L]. \end{cases} \quad (6)$$

В (4)–(6) не учтены перетечки между камерами и атмосферой, а в (5) — силы трения между контактирующими парами: трубка малая — ударник, трубка большая — ударник, ударник — цилиндр.

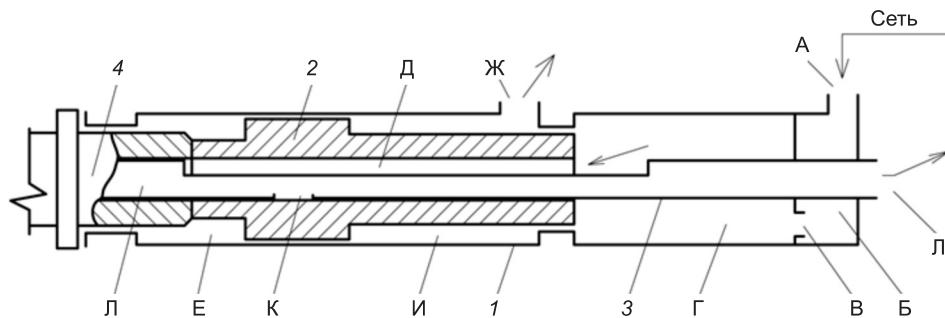


Рис. 3. Принципиальная схема пневмоударного механизма

**Пневмоударный механизм** [6] (рис. 3). Работа механизма осуществляется следующим образом.

Сжатый воздух, после включения устройства впуска, поступает по каналу А с проходным сечением  $\omega_A$  в камеру Б сетевого воздуха с объемом  $V_B$ , далее по каналу В с проходным сечением  $\omega_B$  в распределительную камеру рабочего хода с объемом  $V_B$  в цилиндре 1 массой  $m_k$ , откуда, в зависимости от положения ступенчатого ударника 2 массой  $m_y$  по продольному каналу Д с проходным сечением  $\omega_D$  на трубке З массой  $m_t$  — в управляемую камеру Е холостого хода с объемом  $V_E$ . Кольцевая камера И атмосферного давления с объемом  $V_i$  через выпускной канал Ж с проходным сечением  $\omega_J$  в цилиндре постоянно сообщена с окружающим пространством.

Опорожнение камеры Е происходит периодически через радиальный канал К с проходным сечением  $\omega_K$  в трубке и сквозное отверстие Л с проходным сечением  $\omega_{AL}$ . Под действием разницы силовых импульсов со стороны камер Г, Е и И ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удар по хвостовику инструмента 4. Канал Л может быть использован для пропуска через него стержня или подобных предметов, несколько меньших поперечных размеров.

Существенный недостаток механизма: кольцевая камера И не формирует силового импульса в рабочем цикле.

## Физико-математическое описание механизма [6].

Обозначения и их физический смысл аналогичен (1)–(3).

## Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_B / dt = k / V_B [W(\omega_A \varphi_A - \omega_B \varphi_B)], \\ dp_\Gamma / dt = k / (V_\Gamma - x_y S_\Gamma) [W(\omega_B \varphi_B - \omega_\Delta(x_y) \varphi_\Delta - \omega_K(x_y) \varphi_K) + p_\Gamma (dx_y / dt) S_\Gamma], \\ dp_H / dt = k / (V_H - x_y S_H) [W(\omega_K \varphi_K - \omega_{AJ}(x_y) \varphi_{AJ}) + p_H (dx_y / dt) S_H], \\ dp_E / dt = k / (V_E + x_y S_E) [W(\omega_\Delta(x_y) \varphi_\Delta + \omega_a(x_y) \varphi_a) - p_E (dx_y / dt) S_E], \end{cases} \quad (7)$$

$$B(7) \quad S_H = S_V - S_\Gamma - S_T, \quad S_E = S_V - S_T, \quad S_\Gamma = S_E - S_T.$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2x_y / dt^2 = (p_E S_E - p_\Gamma S_\Gamma - p_I S_I) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y / dt)_o = -k_y (dx_y / dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2x_k / dt^2 = (p_E S_E - p_\Gamma S_\Gamma - p_I S_I - F_H) / m_k & \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k / dt)_o = -k_k (dx_k / dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

$$B(8) \ m_K = m_{\Pi} + m_T.$$

## Термодинамическая составляющая —

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_B}{dt} &= \theta_B / (p_B V_B) [W(\omega_A \varphi_A \Omega_A - \omega_B \varphi_B \Omega_B)], \\ \frac{d\theta_\Gamma}{dt} &= \theta_\Gamma / (p_\Gamma (V_\Gamma - x_y S_\Gamma)) [W(\omega_B \varphi_B \Omega_B - \omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D - \omega_K(x_y) \varphi_K \Omega_K) + (k-1)p_\Gamma(dx_y/dt)S_\Gamma], \\ \frac{d\theta_I}{dt} &= \theta_I / (p_I (V_I - x_y S_I)) [W(\omega_K \varphi_K \Omega_K - \omega_{AJ}(x_y) \varphi_{AJ} \Omega_{AJ}) + (k-1)p_I(dx_y/dt)S_I], \\ \frac{d\theta_E}{dt} &= \theta_E / (p_E (V_E + x_y S_E)) [W(\omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D - \omega_{AL}(x_y) \varphi_{AL} \Omega_{AL}) - (k-1)p_E(dx_y/dt)S_E]. \end{aligned} \quad (9)$$

**Синтезированный пневматический механизм** (рис. 4). Работа синтезированного на основании классификации признаков-элементов пневмоударного механизма осуществляется следующим образом.

Сжатый воздух, после включения устройства впуска, поступает по каналу А с проходным сечением  $\omega_A$  в камеру Б сетевого воздуха с объемом  $V_B$  в цилиндре 1 массой  $m_k$ , далее по дроссельному каналу В с проходным сечением  $\omega_B$  в распределительную камеру Г с объемом  $V_G$ , откуда, в зависимости от положения ступенчатого со сквозным осевым отверстием ударника 2 массой  $m_y$  для пропуска трубы З массой  $m_t$  по перепускному каналу Д, например, в виде паза с проходным сечением  $\omega_D$  в кольцевую камеру Е рабочего хода с объемом  $V_E$ , далее по перепускному каналу Ж, например, в виде паза с проходным сечением  $\omega_J$ , большим  $\omega_D$ , в камеру И холостого хода с выточкой К и суммарным объемом  $V_{II}$ .

Опорожнение камеры И происходит периодически посредством паза Ж при открытии торцом ударника со стороны камеры И радиального канала Л с проходным сечением  $\omega_{ax}$  и продольного канала М с проходным сечением  $\omega_{am} > \omega_{ax}$ .

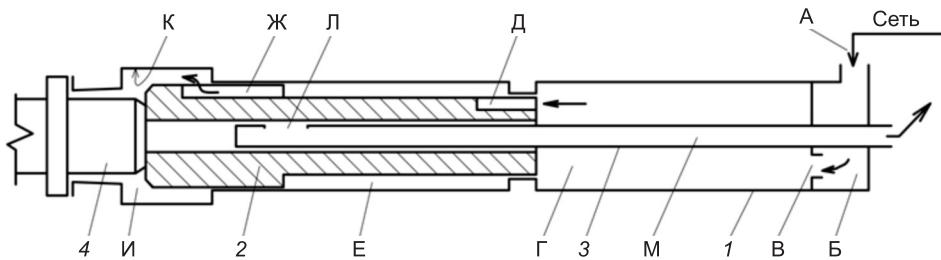


Рис. 4. Принципиальная схема синтезированного пневмоударного механизма

Под действием разницы силовых импульсов со стороны камер И, Е и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента 4. В отличие от первого цикла запуска все следующие холостые ходы осуществляются за счет разницы силовых импульсов со стороны камер И, Е и Г с добавлением импульса отскока  $K_y$  ударника от хвостовика рабочего инструмента.

**Физико-математическое описание синтезированного механизма.** Дополнительные обозначения и их физический смысл:

$\Psi_{шт}, \Psi_{шк}, \Psi_{пк}, \Psi_{пт}, \Psi_{бк}$  — проходные площади кольцевых каналов (зазоров) между штоком ударника и трубкой, штоком ударника и корпусом цилиндра, поршнем ударника и корпусом цилиндра, поршнем ударника и трубкой, буксой корпуса и хвостовиком инструмента;

$\Phi_{шт}, \Phi_{шк}, \Phi_{пк}, \Phi_{пт}, \Phi_{бк}$  — бародинамические функции проходных площадей кольцевых каналов  $\Psi_{шт}, \Psi_{шк}, \Psi_{пк}, \Psi_{пт}, \Psi_{бк}$ ;

$\Omega_{шт}, \Omega_{шк}, \Omega_{пк}, \Omega_{пт}, \Omega_{бк}$  — термодинамические функции проходных площадей кольцевых каналов  $\Psi_{шт}, \Psi_{шк}, \Psi_{пк}, \Psi_{пт}, \Psi_{бк}$ ;

$S_r$  — рабочая площадь штока ударника со стороны распределительной камеры;

$S_E, S_I$  — рабочие площади ударника со стороны камер рабочего и холостого ходов;

$F_{шк}, F_{пк}, F_{ты}$  — силы трения между движущимися контактирующими поверхностями штока ударника и корпусом цилиндра, трубкой и ударником;

$F_h$  — усилие нажатия на корпус цилиндра 1.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_B / dt = k / V_B [W(\omega_A \varphi_A - \omega_B \varphi_B)], \\ dp_\Gamma / dt = k / (V_\Gamma - x_y S_\Gamma) [W(\omega_B \varphi_B - \omega_D(x_y) \varphi_D \pm \\ \pm (\psi_{шт} \varphi_{шт}) \pm (\psi_{шк} \varphi_{шк})) + p_\Gamma (dx_y / dt) S_\Gamma], \\ dp_E / dt = k / (V_E - x_y S_E) [W(\omega_D(x_y) \varphi_D - \omega_J(x_y) \varphi_J \pm \\ \pm (\psi_{шт} \varphi_{шт}) \pm (\psi_{шк} \varphi_{шк}) \pm (\psi_{пк} \varphi_{пк})] + p_E (dx_y / dt) S_E], \\ dp_I / dt = k / (V_I + x_y S_I) [W(\omega_J(x_y) \varphi_J \pm (\psi_{пк} \varphi_{пк}) - \\ - \omega_{AЛ}(x_y) \varphi_{AЛ} \pm (\psi_{пт} \varphi_{пт}) \pm (\psi_{бк} \varphi_{бк})] - p_I (dx_y / dt) S_I]. \end{cases} \quad (10)$$

Для предварительных исследований перетечки между камерами и окружающим пространством  $\Psi_{пт}\varphi_{пт}, \Psi_{пк}\varphi_{пк}, \Psi_{бк}\varphi_{бк}$  для упрощения вычислений можно опускать.

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2 x_y / dt^2 = (p_I S_I - p_E S_E - p_\Gamma S_\Gamma - F_{шк} - F_{пк} - F_{ты}) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y / dt)_o = -k_y (dx_y / dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2 x_K / dt^2 = (p_I S_I - p_E S_E - p_\Gamma S_\Gamma - F_{шк} - F_{пк} - F_{ты} - F_h) / m_K & \text{при } x_K > 0, \\ (dx_K / dt)_o = -k_K (dx_K / dt)_y & \text{при } x_K \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} d\theta_B / dt = \theta_B / (p_B V_B) [W(\omega_A \varphi_A \Omega_A - \omega_B \varphi_B \Omega_B)], \\ d\theta_\Gamma / dt = \theta_\Gamma / (p_\Gamma (V_\Gamma - x_y S_\Gamma)) [W(\omega_B \varphi_B \Omega_B - \omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D) \pm \\ \pm (\psi_{шт} \varphi_{шт} \Omega_{шт}) \pm (\psi_{шк} \varphi_{шк} \Omega_{шк})] + (k-1)p_\Gamma (dx_y / dt) S_\Gamma], \\ d\theta_E / dt = \theta_E / (p_E (V_E - x_y S_E)) [W(\omega_D(x_y) \varphi_D \Omega_D - \omega_J(x_y) \varphi_J \Omega_J) \pm \quad (12) \\ \pm (\psi_{шт} \varphi_{шт} \Omega_{шт}) \pm (\psi_{шк} \varphi_{шк} \Omega_{шк}) \pm (\psi_{пк} \varphi_{пк} \Omega_{пк})] + (k-1)p_E (dx_y / dt) S_E], \\ d\theta_I / dt = \theta_I / (p_I (V_I - x_y S_I)) [W(\omega_J(x_y) \varphi_J \Omega_J - \omega_{AL} \varphi_{AL} \Omega_{AL}) \pm \\ \pm (\psi_{пк} \varphi_{пк} \Omega_{пк}) \pm (\psi_{пт} \varphi_{пт} \Omega_{пт}) \pm (\psi_{бк} \varphi_{бк} \Omega_{бк})] + (k-1)p_I (dx_y / dt) S_I]. \end{array} \right.$$

В (12) для упрощения расчетов можно, как в (10), опустить функции перетечек между камерами и в окружающее пространство.

**Заключение.** Исключение из принципиальной схемы пневматического ударного механизма камеры атмосферного воздуха позволило упростить его устройство и повысить надежность. Кроме того, выпуск отработавшего воздуха только из камеры холостого хода дает возможность сократить расход сжатого воздуха для механизма в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дробильные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: Справ. пособие [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
2. Pat. 1000310 Deutsch. Mit Druckluft betriebene Bohreinrichtung insbesondere fur Tieflohrnugen [Текст] / W. Hrold, W. Seipel. — Publ. 1957.
3. Pat. 3410354 UDSSR. Impact device for driving horizontal holes in soft ground [Текст] / B.V. Sudnishnikov, K.K. Tupitsin, K.S. Gurkov. — Publ. 1968.
4. А.с. 354086 СССР. Пневматическое устройство для образования скважин в грунте [Текст] / Б.В. Суднишников, А.Д. Костылев, К.С. Гурков и др. — Опубл. 1972, Бюл. № 30.
5. А.с. 927998 СССР. Бесштанговый снаряд ударного действия для проходки скважин [Текст] / Б.В. Суднишников, В.В. Каменский, К.К. Тупицын, Э.П. Варнелло. — Опубл. 1982, Бюл. № 18.
6. А.с. 727753 СССР. Пневматическое устройство ударного действия [Текст] / В.П. Богинский, Б.Н. Смоляницкий. — Опубл. 1980, Бюл. № 14.
7. А.с. 1172692 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. — Опубл. 1985, Бюл. № 30.
8. А б р а м е н к о в, Э.А. Об изменении вибрационных и силовых характеристик пневматического ударного механизма в зависимости от структуры его мощности [Текст] / Э.А. Абраменков, Л.Л. Лысенко // Ручной механизированный инструмент. Гигиеническая оценка: Сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1978. — С. 75–78.
9. И д е л ь ч и к, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1975. — 559 с.

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

*КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*КУТУМОВ Алексей Анатольевич, д-р техн. наук, доц.*

*Рубцовский индустриальный институт*

Получено 15.10.14

**Abramenkov Dmitry Eduardovich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Abramenkov Eduard Alexandrovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Dedov Alexey Sergeevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Krutikov Eugeny Igorevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kutumov Alexey Anatolievich**, doctor of technical sciences, assistant professor, Rubtsovsk Industrial Institute, Russia

## **ANALYSIS OF SCHEMATIC DIAGRAMS AIR PERCUSSION MECHANISMS WITH THE EXHAUST OF AIR FROM THE CHAMBER IDLING AND THEIR PHYSICO-MATHEMATICAL DESCRIPTION**

Considered physico-mathematical description of the mechanisms valveless type and the function of their characteristics-elements in comparison with the synthesized mechanism.

**Key words:** air percussion mechanism, the tubular duct, the bypass channel, luggage stroke, luggage, idle air flow.

### **REFERENCES**

1. A b r a m e n k o v, E.A. Pneumatic mechanisms of impact machines: throttle, inkjet, without spool, valveless: Ref. Manual [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov // Novosibirsk : Publishing house of Novosibirsk university, 1993. — 430 p.
2. Pat. 1000310 Deutsch. Mit Druckluft betriebene Bohreinrichtung insbesondere fur Tieflohrnugen [Text] / W. Hrold, W. Seipel. — Publ. 1957.
3. Pat. 3410354 UDSSR. Impact device for driving horizontal holes in soft ground [Text] / B.V. Sudnishnikov, K.K. Tupitsin, K.S. Gurkov. — Publ. 1968.
4. A.s. 354086 the USSR. Pneumatic device for the formation of holes in the ground [Text] / B.V. Sudnishnikov, A.D. Kostylev, K.S. Gurkov et al. — Publ. 1972, Bul. N 30.
5. A.s. 927998 the USSR. Rodless projectile impact for sinking wells [Text] / B.V. Sudnishnikov, V.V. Kamenskiy, K.K. Tupitsyn, E.P. Varnello. — Publ. 1982, Bull. N 18.
6. A.s. 727753 the USSR. Pneumatic percussion [Text] / V.P. Boginskiy, B.N. Smolyanitskiy. — Publ. 1980, Bull. N 14.
7. A.s. 1172692 the USSR. Pneumatic hammer [Text] / E.A. Abramenkov, A.G. Bogatencov, V.P. Bryzgalov. — Publ. 1985, Bull. N 30.
8. A b r a m e n k o v, E.A. About the change of the vibration and power characteristics of a pneumatic percussion mechanism depending on the structure of its power [Text] / E.A. Abramenkov, L.L. Lysenko // Hand power tools. Hygienic assessment: collection of scientific papers, IGD SO AN SSSR. — Novosibirsk, 1978. — P. 75–78.
9. I d e l c h i k, I.E. The Handbook of hydraulic resistance [Text] / I.E. Idelchik. — M. : Mashinostroenie, 1975. — 559 p.

## **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ**

**УДК 711.4(571.1)**

**О.А. МАНАЦКОВА**

### **ВЗАИМОСВЯЗЬ САКРАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКОЙ**

Рассматриваются взаимосвязи сакральных православных сооружений с окружающей застройкой крупных сибирских городов, их участие в архитектурных ансамблях. Кратко освещаются проблемы расположения храмов в городской застройке. Предлагаются варианты их решения.

**Ключевые слова:** сакральные православные сооружения, ландшафт, архитектурные доминанты, архитектурные ансамбли, строительство.

Распространение православия на территории Сибири стало возможным благодаря тому, что в XVII в. началось масштабное освоение края, бывшего тогда малонаселенным и суровым, первыми поселенцами, носителями православной культуры.

Сибирские города Томск, Омск были основаны в период с начала XVII по первую четверть XVIII в. как поселения русских первопроходцев, имеющие своей главной функцией военно-стратегическую. На начальном этапе развития функциональными и планировочными центрами их планировки являлись главные площади крепостей, организующиеся вокруг зданий крепостных православных храмов. Эти храмы были очень значимы для поселенцев и возводились одновременно с фортификационной основой (рис. 1, 2).

В условиях регулярного градостроительного развития городов Сибири в конце XVIII — первой половине XIX в. объекты православно-церковной архитектуры, исторически выступавшие в качестве главных композиционно-смысовых доминант городских объемно-планировочных систем, сохранили свои традиционные функции и значение и, более того, усилили их в формирующихся укрупненных, централизованных структурах города [1].

Создание в центрах Омска и Томска в 40–90-х гг. XIX в. крупномасштабной архитектуры кафедральных православных соборов было определено (Томск) или предписано (Омск) осуществлявшимися проектами их планировки. Главной причиной создания в центрах исторических городов Сибири в 40–90-х гг. XIX в. монументальных православных соборов явилась потребность различных слоев населения в национально-культурных символах регионов. Основной повод, повлекший начало масштабного храмостроительства, — это несоответствие зданий действующих храмов, возведенных в XVIII — начале XIX в., численности населения.

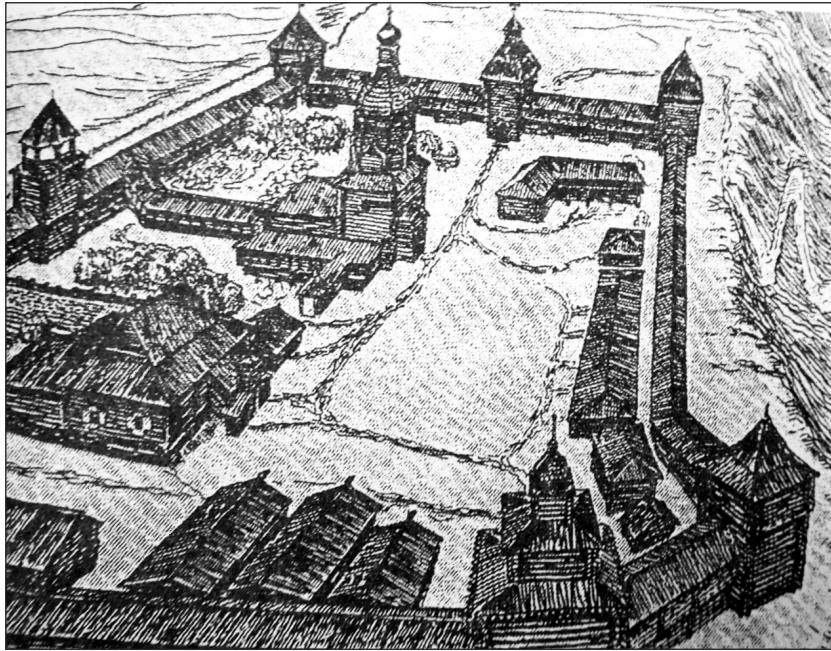


Рис. 1. Томский «город» (острог) XVII в. Общий вид. Реконструкция Православный храм во имя Пресвятой Троицы — функционально-смыслоевой (сакральный) и архитектурно-планировочный центр первоначального русского поселения на р. Томи

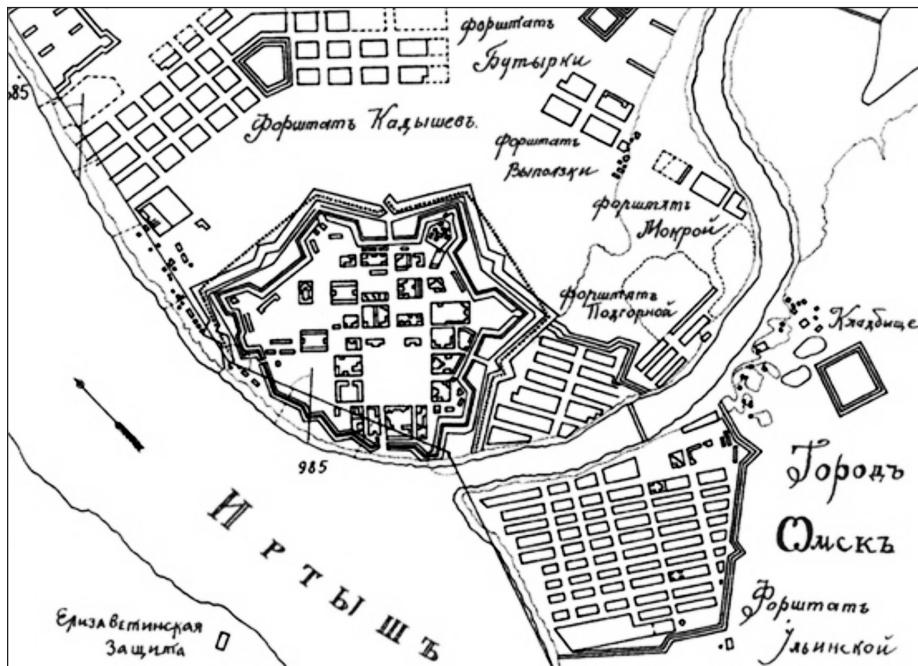


Рис. 2. Омская крепость и окружающие ее форштадты

Ключевое идеально-символическое значение русского православного храма, неизменно претендовавшего «на главное и самое людное место в городе», его важнейшие архитектурно-художественные характеристики, как то: монументальность, центричность вертикальной композиции и свя-

занная с нею кубическая форма основного объема, относительная равнозначность всех четырех фасадов, богатая наружная декорация, — обусловливали традиционность расположения его не только в композиционном центре города, но и на открытом, допускающем всесторонний обзор, пространстве [1].

Поиск наиболее приемлемого варианта размещения сооружения в границах площади обычно приводил к размещению храма в ее геометрическом фокусе. На площадь с храмом выходили наиболее «важные» здания, и от крепостных ворот сходились основные улицы. Эти улицы переходили в главные магистрали города, благодаря этому создавалась планировочная связь кремля с посадами.

Необходимо принять во внимание, что логика исторического развития городов Сибири привела к сооружению в середине-конце XIX в. в их центрах крупномасштабных кафедральных храмов. Таким образом, местоположение соборов Успения Божией Матери в Омске, Пресвятой Троицы в Томске выделяло их в качестве композиционных доминант архитектурно-планировочных ансамблей городских центров.

Принципы сибирского регулярного городского строительства конца XVIII — начала XIX в. акцентировали значение православно-церковной архитектуры в развитии города. В процессе градоформирования сакральные сооружения играли ведущую роль. Они размещались не только в центре городского ансамбля, но и на открытом пространстве со всесторонним обзором. Таким пространством обыкновенно являлась площадь.

В наши дни остро стоит вопрос об охране и реконструкции памятников культуры, в частности культовых сооружений, которые больше других памятников подвергались разрушению [2]. Не менее актуален вопрос, связанный со строительством новых храмов и часовен. Они возводятся при больницах, в новых жилых районах.

Одной из попыток решения существующих проблем может послужить ансамблевый подход при восстановлении и новом строительстве храмов [2]. Концепция ансамблевой эстетики строится по классическому принципу от общего к частному. От истории города или улицы к объекту, от окружающего ландшафта и рельефа к зданию. В концепции обязательно учитывается ансамблевая взаимосвязь архитектурного сооружения с природной и городской средами. Опираясь на такие принципы, можно попытаться исправить ситуацию.

Храмостроительство можно разделить на два периода. Первый — с возникновения каменного храмостроения на территории области второй половины XVIII в. до прекращения строительства храмов в начале XX в. — характеризуется целостностью стилистического и объемно-планировочного решений. Второй период — со второй половины XX в. до наших дней. Это так называемый «современный» период. Ему присущи отсутствие архитектурной целостности при восстановлении, а также новое строительство православных храмов.

Целостность подхода первого периода заключается во взаимосвязи объемно-планировочных и стилевых решений храмовой архитектуры. Она является важнейшей составляющей ансамблевой эстетики и может служить примером для развития культовой архитектуры на современном этапе.

Исследование храмовой архитектуры Западной Сибири затрагивает широкие временные рамки. Процесс нового храмового строительства, охвативший государство, а вместе с ним и Сибирь, заставляет архитекторов обращаться не только к общероссийскому наследию архитектуры, но и к местным традициям. Кроме того, реконструкция разрушенных сакральных сооружений требует знаний стилевых приемов, применяемых в архитектуре края.

Как доминанты храмы и монастырские комплексы подчиняли себе окружающую застройку и фиксировали композиционные центры в планировке города, так и сами храмы формировали вокруг себя свою особенную территорию, функционально нуждаясь в ней и гармонично ее регулируя. Территория вокруг храма — это особое пространство, подчиненное в первую очередь богослужебной функции здания и призванное выражать в материальной природе, как символе, образы Царствия Небесного [2].

Кроме планировочных аспектов организации прихрамовой среды выделяют филологический аспект (прихрамовая среда, как обособленная часть общества со своим образом жизни и даже своим фольклором), образность организации среды прихрамового пространства (в основном в связи с библейскими событиями, ссылками на жития святых). Учитывая это, необходимо и в планировочной организации храмовой территории выразить всю многомерность ее бытия [2].

Планировочная организация храмовой территории определяется многими факторами. Одним из них является функциональное назначение храма. Храмовые комплексы можно разделить на примерные типы: кафедральный, монастырский, приходской, в составе общественных зданий и комплексов, таких как кладбище, больницы, тюрьмы. На территории обязательно присутствуют постройки: богослужебные, служебно-бытовые, просветительские, хозяйствственные и бытовые, благотворительные.

Пространство храмовой территории делится на зоны: входную, площадь перед святыми вратами, дорога вокруг храма для совершения крестного хода, озелененное пространство. На территории храма могут располагаться различные малые архитектурные формы: скамьи, киоски. Территория огораживается по всему периметру.

Таким образом, можно сделать вывод, что территория вокруг храма является неотъемлемым элементом храмового ансамбля. Каждый элемент ее благоустройства должен поддерживать стилистику всего ансамбля. Ярким примером организации такой территории может служить Иоанно-Предтеченский женский монастырь (рис. 3).

Архитектурный ансамбль, как правило, по своим размерам меньше города. Его можно сравнить с районом или трактовать как группу зданий. Данная группа зданий должна обладать композиционной целостностью, но очень часто достичь этого качества в полной мере не удается.

Необходимо выделять из застройки элементы и формировать из них структуры, обладающие качеством ансамбля. При создании ансамбля нужно учитывать соотношение объемов зданий, систему восприятия и систему отображения объекта. Формирование ансамблей объясняется динамикой развития города.

Впечатление градостроительной целостности и архитектурной завершенности зависит не только от восприятия градостроительной ситуации

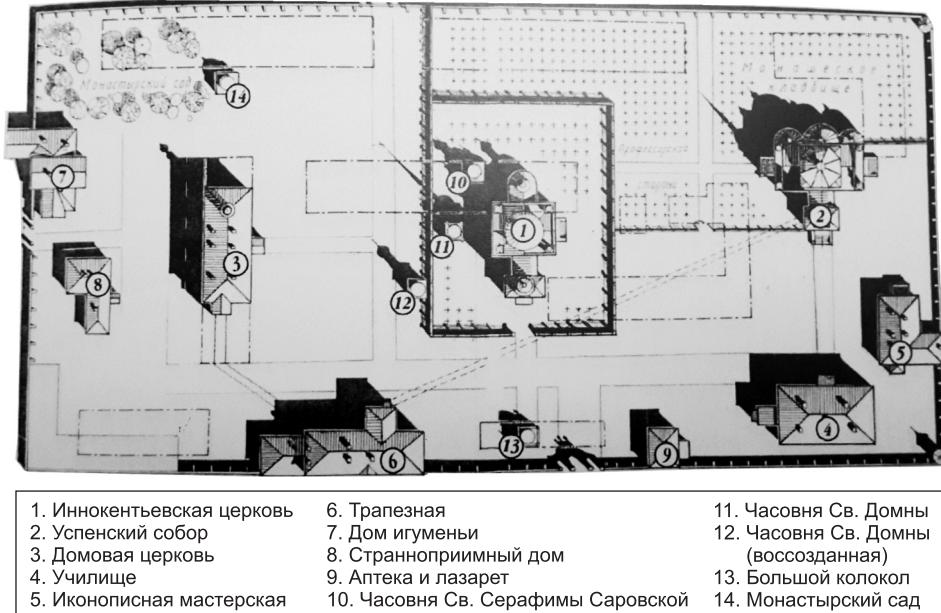


Рис. 3. Графическая реконструкция плана Иоанно-Предтеченского женского монастыря.  
Авторы Ю.П. Нагорнов, Г.В. Скворцов

в целом, но и от степени решенности и сохранности отдельных фрагментов города и даже отдельного ансамбля [3].

Человек видит не плоское изображение фасада, а объект в его пространственном окружении. Строители всех периодов старались «вписать» свои проекты в уже сложившееся архитектурное окружение, стремились сохранить исторические доминанты.

Для сохранения общей архитектурно-исторической ситуации, для обеспечения исторически обусловленного органичного и последовательного развития города в первую очередь рекомендуется учитывать существующую планировочную и архитектурную ситуацию [3].

Очень важным принципом сохранения облика исторического города является поддержание силуэтности застройки. Зодчие прошлого ставили в рядовой застройке массивные и высокие здания храмов, окружая их менее высотной и «тяжелой» застройкой. Возле массивных соборов целесообразнее располагать более легкие и мелкообъемные здания. При возведении новых зданий в ряду исторической застройки рекомендуется добиваться пластической проработки их фасадов, по степени детализации корреспондирующих с окружением [3].

Возникает сложная задача строительства домов повышенной этажности во взаимосвязи с исторической застройкой сакральных сооружений. Необходимо создать линии высотных ограничений вблизи сакральных сооружений. Они дали бы возможность историческому сооружению иметь круговое обзорное пространство, сформировали бы силуэт новой застройки, не нарушающей исторически сложившихся очертаний. К сожалению, заданная высота проектируемого здания — далеко не единственное условие для обеспечения его взаимосвязей с окружающей застройкой. Следует ограничить строительство новых сооружений в исторической зоне сакральных сооружений.

При строительстве новых объектов в границах исторических сакральных сооружений возникает ряд нюансов. Нужно сохранить элементы, формирующие облик храма. Это вызывается органичным соединением нового и старого, композиционной взаимосвязью. Легко представить, что проблемы взаимосвязей прошлого с новым сохранятся еще многие десятилетия, но уменьшить их влияние в наших силах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туманик, А.Г. Архитектура православных кафедральных храмов Сибири второй половины XIX века: учеб. пособие для вузов [Текст] / А.Г. Туманик. — Новосибирск : НГАХА, 2003. — 312 с.
2. Хрюкина, М.Т. Ансамблевая эстетика православного храма: моногр. [Текст] / М.Т. Хрюкина, А.Г. Лызина. — Пенза : ПГУАС, 2012. — 306 с.
3. Пруцын, О.И. Архитектурно-историческая среда: Учеб. для вузов [Текст] / О.И. Пруцын. — М. : Институт искусства реставрации, 2004. — 440 с.

*МАНАЦКОВА Ольга Александровна, асп.; E-mail: Olgamanatskova@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 22.10.14

**Manatskova Olga Alexandrovna**, post-graduate student; E-mail: Olgamanatskova@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### **THE RELATIONSHIP OF THE SACRED BUILDINGS OF WESTERN SIBERIA WITH THE SURROUNDING BUILDINGS**

The article discusses the relationship of sacred Orthodox buildings with surrounding buildings large Siberian cities, their participation in architectural ensembles. Briefly highlights the location of churches in urban areas. Suggests solutions.

**Key words:** orthodox sacred buildings, the landscape, the dominant architecture, architecture, construction.

#### REFERENCES

1. Tumanik, A.G. The architecture of the orthodox cathedral churches of Siberia in the second half of the nineteenth century: the textbook for high schools [Text] / A.G. Tumanik. — Novosibirsk : NGAHA, 2003. — 312 p.
  2. Khryukina, M.T. Ensemble aesthetics of the orthodox church: monogr. [Text] / M.T. Khryukina, A.G. Lysina. — Penza, 2012. — 306 p.
  3. Pruzin, O.I. Architectural and historic environment: a Textbook for high schools [Text] / O.I. Pruzin. — M. : Institute of art restoration, 2004. — 440 p.
-

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**УДК 532.593.001**

**С.А. ВАЛЬГЕР, М.Н. ДАНИЛОВ, Н.Н. ФЕДОРОВА, А.В. ФЕДОРОВ**

### **СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ANSYS, AUTODYN И LS-DYNA\***

Статья посвящена численному решению задачи ударно-волнового воздействия на простую призматическую конструкцию с использованием программного комплекса компьютерной инженерии ANSYS. Разработана и описана технология решения задачи определения динамических нагрузок на строительные конструкции с помощью модулей AUTODYN и LS-DYNA. Для расчета взрывной нагрузки на модельный объект использовано три подхода: моделирование процесса детонации взрывчатого вещества и последующего распространения взрывной волны в воздушной среде (гидродинамический подход); подход, основанный на применении эмпирических функций, описывающих исследуемую проблему (упрощенный), а также их комбинация. Проведено сопоставление полученных результатов с доступными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** взрыв, ударно-волновые воздействия, программные комплексы, ANSYS, AUTODYN, LS-DYNA.

**1. Введение.** Возникновение чрезвычайных ситуаций на взрыво- и пожароопасных производствах, а также рост общественной опасности террористических актов, совершенных посредством взрывов, обусловливают определение их последствий и разработку защитных мероприятий для обеспечения взрывобезопасности и взрывоустойчивости зданий и сооружений. Недавний случай падения на территории России метеороида показал острую необходимость разработки защитных мероприятий, позволяющих минимизировать последствия воздействия ударных волн на строительные конструкции в чрезвычайных ситуациях нетехногенного характера.

В России взрывобезопасность промышленных и гражданских объектов регламентируется рядом нормативно-технических документов\*\*. В СНиП 2.01.07–85 расчет зданий и сооружений по предельным состоя-

\* Выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 211, задание № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания, Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-07-06581 А.

\*\* Строительные нормы и правила. СНиП 2.01.07–85\*. Нагрузки и воздействия. М.: ФГУП ЦПП, 2010. 72 с.; Строительные нормы и правила. СНиП 2.09.02–85\*. Производственные здания. М.: ФГУП ЦПП, 2010. 19 с.; Единые правила безопасности при взрывных работах. ПБ 13-407-01: Постановление Федерального горного и промышленного надзора России от 30 января 2001 г. № 3; Технический регламент о безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах: Постановление Правительства РФ от 24 февраля 2010 г. № 86.

ниям рекомендуется выполнять с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок при взрывных воздействиях. Однако нормативная база дает возможность определять параметры ударно-волновых воздействий на строительные объекты только в простейших случаях. Упрощенная методика не позволяет выполнить оценку с учетом сложной ударно-волновой картины течения, реализующейся при взрыве зарядов взрывчатых веществ (ВВ) вблизи нескольких объектов. Таким образом, разработка методики оценки процесса распространения и поражающего эффекта взрыва с целью предотвращения и минимизации неблагоприятных последствий имеет первостепенное значение для обеспечения взрыво- и пожаробезопасности строительных объектов.

Большинство повреждений от наземных взрывов образуются вследствие воздействия ударной волны (УВ), которая возникает в результате взрыва. Интенсивность УВ зависит от энергии, выделившейся в результате взрыва, и быстро убывает в зависимости от расстояния до эпицентра. Повреждения строительных конструкций вызывают избыточное давление, превышающее атмосферный уровень всего лишь на 3–5 %. Кроме того, опасны отрицательные значения избыточного давления, приводящие к повреждению стеклянных и других легкосбрасываемых конструкций. Поэтому необходимо адекватно моделировать процесс прохождения УВ и ее действие на конструкции с учетом возможных отражений от поверхности земли и окружающих объектов.

Расчеты устойчивости зданий под воздействием ударно-волновых нагрузок, разработка эффективных мероприятий по защите сооружений от последствий взрывов являются также актуальными. Подобные расчеты подразумевают решение сопряженной задачи динамики реализующегося при взрыве внешнего течения совместно с расчетом отклика конструкции на внешнее динамическое воздействие.

Быстрый рост мощностей современных ЭВМ, совершенствование алгоритмов расчета и развитие современных программных комплексов позволяют проводить численное моделирование распространения детонационных и ударных волн в окружающей среде с учетом их взаимодействия с границами области течения, а также деформации и разрушения конструкций.

Моделирование может быть выполнено в современных программных комплексах инженерного анализа (CAE) таких, как ANSYS CFD (CFX и Fluent), ANSYS AUTODYN [1], LS-DYNA [2] и др., позволяющих решать широкий спектр прикладных задач газовой динамики, механики деформируемого твердого тела и проводить сопряженные расчеты взаимодействия потоков со структурами (FSI).

В НГАСУ (Сибстрин), при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения ФЦП\* и государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания, с 2009 г. проводятся исследования высокоскоростных течений с ударными и детонационными волнами. В ходе осуществления этих проектов разработана расчетная технология для решения задач о распространении ударных волн и взрывном воздействии на строительные конструкции,

---

\* ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Соглашение № 14.B37.21.0645.

основанная на применении полных математических моделей и современных программных средств компьютерной инженерии, произведено моделирование ветровых [3] и ударно-волновых [4–6] воздействий на конструкции.

Целью настоящей работы является тестирование расчетной технологии на доступных экспериментальных данных и сопоставление разных подходов и программных средств для решения задачи о распространении воздушной УВ и ее воздействии на призматическое тело, расположенное на твердой подложке.

**2. Постановка задачи.** Рассмотрим задачу о воздействии воздушного взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества на призматическое тело ( $0,061 \times 0,183 \times 0,183$  м), установленное на поверхности земли на расстоянии 1,5 м от точки взрыва. Схема задачи в разрезе и геометрия 3D призматической конструкции приведены на рис. 1. Конструкция предполагается недеформируемой и неподвижно закрепленной на абсолютно жесткой подложке.

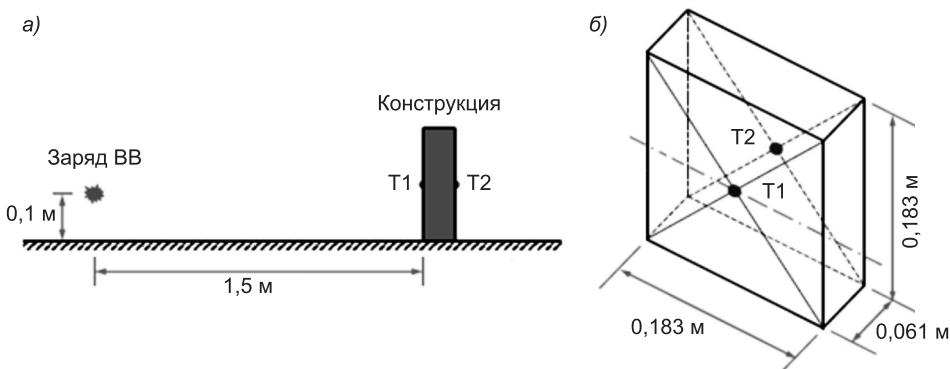


Рис. 1. Схема задачи в разрезе (а) и модель 3D конструкции (б)

Вокруг конструкции численно сформирована внешняя расчетная воздушная среда, в которой заданы нормальные атмосферные условия со следующими параметрами: плотность  $\rho_{\text{в}} = 1,225 \text{ кг}/\text{м}^3$ , температура  $T = 298,15 \text{ К}$ , статическое давление  $P = 101325 \text{ Па}$ , теплоемкость  $C_p = 1004 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

В [7] приведены результаты экспериментальных исследований взрыва BB Demex массой 23,7 г (тротиловый эквивалент  $M_{\text{TNT}} = 27,26 \text{ г}$ ) в окрестности призмы. В эксперименте измерено давление в точках T1 и T2, расположенных на расстоянии  $h = 0,0915 \text{ м}$  от земли на наветренной и подветренной сторонах призмы (см. рис. 1). При моделировании в качестве BB использован тротил массой 27,26 г со следующими параметрами [8, 9]: плотность  $\rho_{\text{BB}} = 1,60 \text{ кг}/\text{м}^3$ , скорость детонации  $D = 6,93 \cdot 10^3 \text{ м}/\text{с}$ , давление Чепмена–Жуге  $P_{CJ} = 21,0 \text{ ГПа}$ .

**3. Математическая модель.** Поведение воздушной среды определяется системой уравнений Эйлера, дополненной уравнением состояния идеального газа. Течение расширяющихся продуктов детонации тротила описывается с помощью гидродинамической модели материала [9] с использованием уравнения состояния Джона–Уилкинса–Ли (JWL):

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V},$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $\omega$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  — эмпирические константы:  $A = 3,712 \cdot 10^{11}$ ,  $B = 3,231 \cdot 10^9$ ,  $R_1 = 4,15$ ,  $R_2 = 0,95$ ,  $\omega = 0,30$ ,  $E_0 = 7,0 \cdot 10^9$ ,  $V_0 = 1,00$ ;  $E$  — внутренняя энергия на единицу объема;  $V = \rho / \rho_0 = v / v_0$  — относительный удельный объем.

**4. Методика проведения расчетов.** Расчеты выполнены в среде Workbench программного комплекса ANSYS 15.0 в модулях AUTODYN [1] и LS-DYNA [2] в гидродинамической постановке, по явной схеме с помощью метода конечных объемов. Для аппроксимации уравнений Эйлера использован метод Годунова второго порядка точности по пространству [10, 11] и метод коррекции потоков (FCT) [12]. Решение задачи разбито на два этапа. Поскольку начальный процесс детонации ВВ в открытом пространстве хорошо описывается в предположении сферической симметрии до того момента, как фронт волны достигает поверхности подложки, задача решается в одномерном приближении. Результаты, полученные в одномерной задаче о сферическом взрыве на некоторый момент времени  $t^*$  (в данных расчетах  $t^* = 2,1 \cdot 10^{-2}$  мс), интерполируются на трехмерную расчетную область и моделируются распространение сформировавшейся воздушной УВ и ее взаимодействие с поверхностью подложки и конструкцией.

Расчеты в LS-DYNA выполнялись с использованием метода конечных элементов и явной разностной схемы второго порядка точности по времени. Моделирование учитывало различные подходы. Первый (гидродинамический) подход описан выше. Он является наиболее полным, и, как ожидается, более точным, однако, естественно, весьма трудоемок при подготовке расчетной модели и требует больших затрат компьютерных ресурсов и времени при проведении расчетов.

Второй (эмпирический) подход состоит в задании взрывной нагрузки на поверхность конструкции с помощью эмпирической функции CONWEP [13–16], описывающей зависимость давления, скорости воздушного потока, температуры и других параметров от времени. Функция позволяет моделировать взрывное воздействие на конструкцию, не решая при этом трудоемкие задачи детонации ВВ и распространения УВ. В [17] показано, что данная функция может успешно использоваться при моделировании взрывного воздействия на здания и другие строительные конструкции. Функция CONWEP описывает повышение давления на фронте волны из-за отражения от поверхности земли, но не учитывает эффекты «затенения» ударной волны объектами, лежащими на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции [17, 18]. Кроме того, область применения функции ограничена значениями приведенного расстояния  $Z$ :

$$0,178 \text{ м/кг}^{1/3} < Z < 40,0 \text{ м/кг}^{1/3},$$

где  $Z = R / W^{1/3}$ ;  $R$  — расстояние до заряда ВВ;  $W$  — вес заряда, кг.

В третьем (комбинированном) подходе значения газодинамических переменных, полученные с помощью функции CONWEP, заданы в качестве граничного условия во входном сечении расчетной области, расположенной

ложенном на некотором расстоянии от объекта. Это позволило решить задачу без моделирования процесса детонации ВВ и значительно сократить расчетную область, что существенно при решении трехмерных задач. Так, в первом подходе размеры расчетной области составляли  $3,0 \times 1,0 \times 1,0$  м. Использование комбинированного подхода дало возможность сократить размеры расчетной эйлеровой области до  $1,0 \times 1,0 \times 1,0$  м.

В эмпирическом подходе создавать расчетную область для воздушной среды не требуется, так как все параметры взрывной нагрузки вычисляются на стенках призматического тела, которое в данной работе считалось недеформируемым. На внешних границах эйлеровой области задавались «мягкие» неотражающие граничные условия, обеспечивающие выход возмущений за границы расчетной области, на подложке и гранях призмы — условия непротекания (равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости).

Геометрическая модель создана в приложении ANSYS DesignModeler. Для построения расчетной сетки использовалось приложение ANSYS Meshing. Движение среды описывалось с помощью эйлеровых и произвольных лагранжево-эйлеровых сеток (ALE) [2]. В настоящей работе ALE-сетка была построена с целью моделирования отклика конструкции на ударно-волновое воздействие, которое планируется провести на следующих этапах работы. Воздушная область покрыта равномерной структурированной гексагональной сеткой с характерным размером элементов 1 и 2 см; призматическое тело дискретизировано с помощью прямоугольной лагранжевой сетки с размером элементов 4,5 см. Расчетная сетка в зависимости от размера ячеек и постановки задачи включала  $10^6 - 5 \cdot 10^6$  ячеек. Фрагмент расчетной сетки представлен на рис. 2.

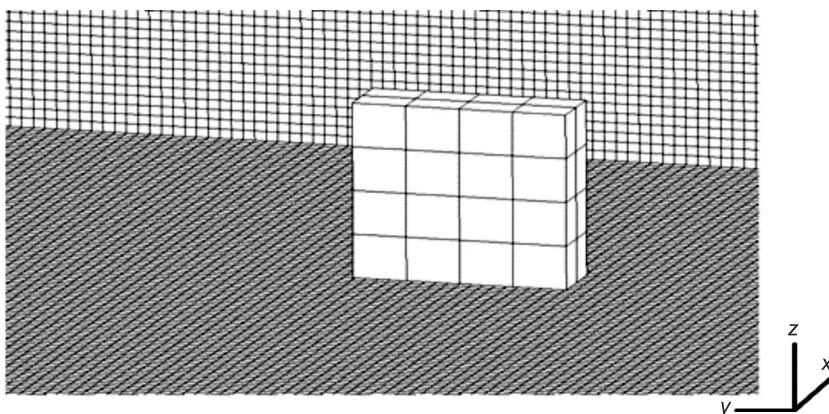


Рис. 2. Расчетная сетка

**5. Волновая структура течения.** В начальный момент времени происходит подрыв заряда ВВ, в результате чего образуется сферическая область продуктов детонации с высоким давлением и температурой. Расширяющиеся продукты детонации формируют сферическую ударную волну, которая распространяется во внешнюю область со сверхзвуковой скоростью. УВ имеет характерный профиль с узким и крутым фронтом повышения давления и других параметров, за которым следует зона снижения параметров в направлении к эпицентру взрыва. УВ вовлекает в движение окружающий воздух, что приводит к образованию сильного ветра.

Если взрыв произошел на некоторой высоте над поверхностью земли, при достижении фронта сферической УВ земли происходит ее отражение, которое схематично показано на рис. 3. По мере распространения УВ угол, под которым волна подходит к поверхности, возрастает. В некоторый момент времени регулярный режим отражения изменяется на нерегулярный с образованием ножки Маха и тройной точки. Следует отметить, что давление за прямым скачком (ножкой Маха) существенно выше, чем за косой ударной волной. Отраженные волны интерферируют и движутся в направлении к эпицентру, где в некоторый момент времени происходит их «схлопывание» с образованием нового фронта более слабой УВ, распространяющегося во внешнюю среду от эпицентра (второй фронт).

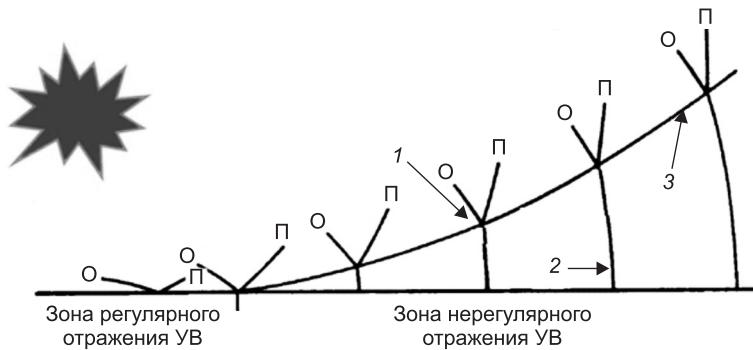


Рис. 3. Схема отражения от поверхности земли фронта сферической УВ, образовавшейся в результате воздушного взрыва

П — падающая волна, О — отраженная  
1 — тройная точка; 2 — ножка Маха; 3 — огибающая тройных точек

Фронт первичной УВ подходит к конструкции, отражается от нее и дифрагирует вокруг ее поверхности с образованием зоны разрежения вблизи верхней грани. Суммарное воздействие взрыва на конструкцию складывается из обусловленного ветром динамического давления  $P_{q0}$ , давления падающей  $P_{SO}$  и отраженной  $P_R$  УВ (рис. 4), в результате чего действующее на конструкцию давление существенно превышает пиковое давление УВ  $P_{SO}$ . После некоторого периода времени, когда УВ продвигается от эпицентра на определенное расстояние, давление за фронтом УВ падает ниже атмосферного и наступает «отрицательная» фаза (фаза разрежения), которая имеет небольшую амплитуду, но большую продолжительность по сравнению с «положительной» фазой. Волновая картина взрывного воздействия осложняется многочисленными интерференционными явлениями между первичными, вторичными и отраженными фронтами, дифракцией и отражением УВ от подложки и призмы, что приводит к образованию вторичных пиков давления.

В результате расчетов в модулях Autodyn и LS-DYNA программного комплекса ANSYS получена картина течения в окрестности призматического тела, поля газодинамических величин (давления, температуры плотности, скорости, концентрации продуктов детонации и др.) и профилей давления на стенки призмы в целевых точках T1 и T2 в зависимости от времени.

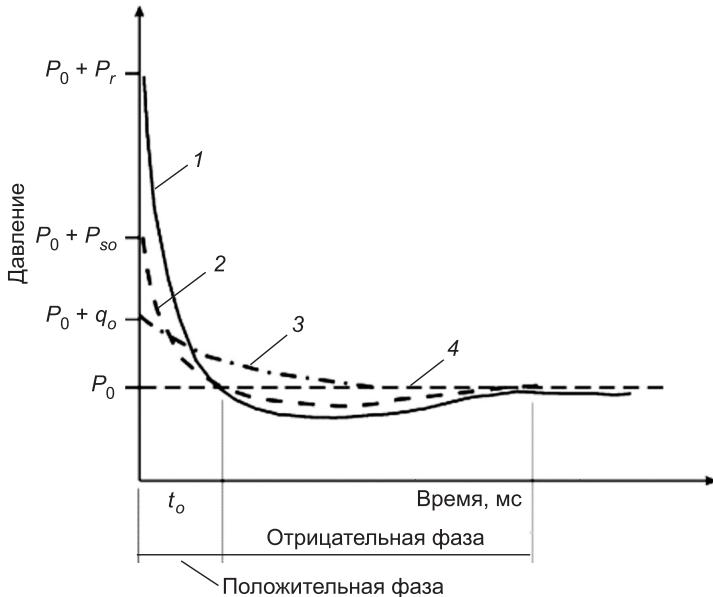


Рис. 4. Схематический профиль давления, действующий на конструкцию в зависимости от времени

1 — отраженное давление; 2 — падающее; 3 — динамическое; 4 — давление окружающей среды

**6. Результаты расчетов в модуле AUTODYN.** На рис. 5 приведены полученные в расчете поля статического давления в плоскости симметрии и границах расчетной области в некоторые характерные моменты времени. Как видно из рис. 5, *а*, соответствующего моменту времени  $t = 0,018$  мс, фронт первичной УВ (1) отражается от поверхности земли регулярным образом. На рис. 5, *б* режим отражения УВ от подложки изменился на нерегулярный с образованием ножки Маха (2). Фронт волны, состоящий из участков первичной волны (1) и ножки Маха (2), распространяется в воздушной среде от эпицентра по направлению к призме. В это же время отраженные волны (3) и (4), исходящие из тройной точки маховской конфигурации, движутся к эпицентру, где после их взаимодействия образуется фронт вторичной волны (5). На рис. 5, *д* показано распределение давления на более поздний момент времени, когда отраженная ударная волна приходит на стенку призмы.

В момент времени  $t = 2,6$  мс (рис. 5, *е*) первичная УВ (2) приходит на фронтальную стенку призмы и отражается от нее ударной волной (6), что сопровождается резким увеличением статического давления. В следующий момент времени  $t \approx 2,9$  мс давление на стенке призмы начинает падать и наступает «отрицательная» фаза, при которой статическое давление вблизи стенки опускается ниже 1 атм. Рис. 5, *ж*, *з* показывают дифракцию волны (2) на призме и распространение отраженной УВ (6) в направлении эпицентра. В дальнейшем отраженная УВ (6) и вторичная волна (5) интерферируют, что приводит к образованию новой системы ударных фронтов меньшей интенсивности, которая оказывает влияние на распределение давления на поверхности призмы.

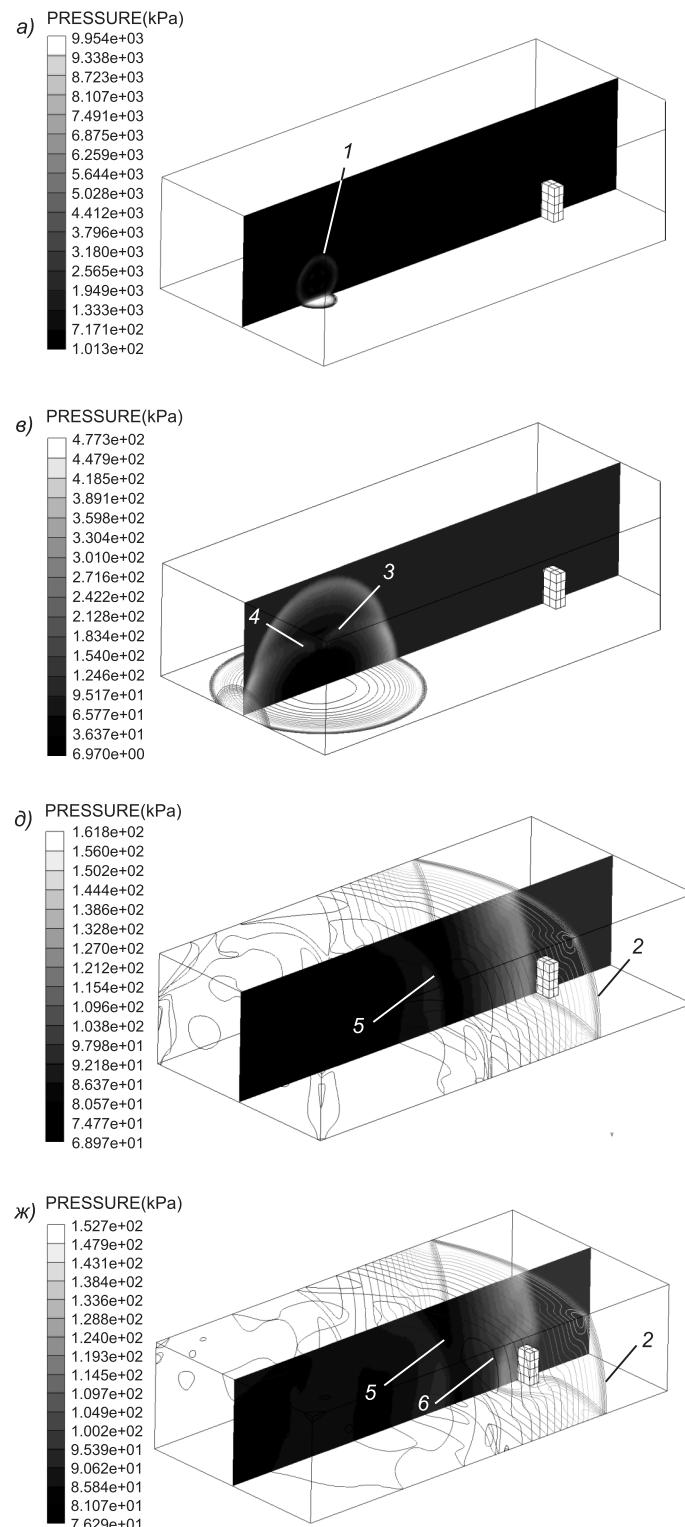
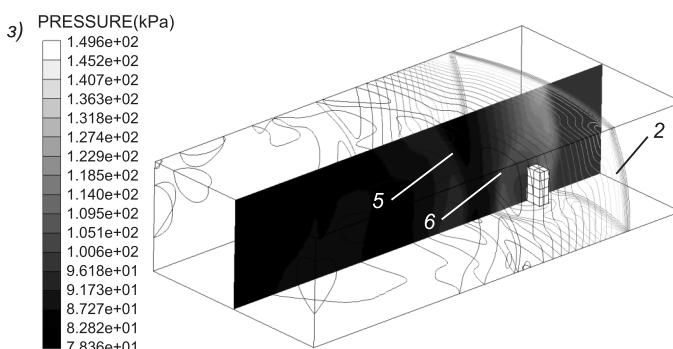
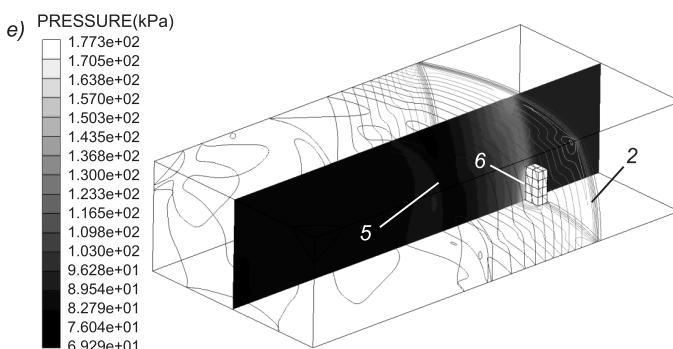
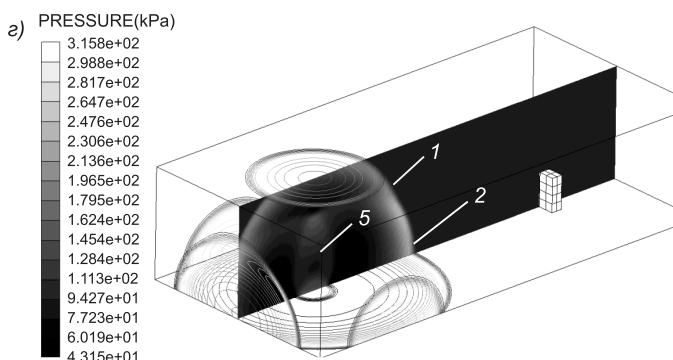
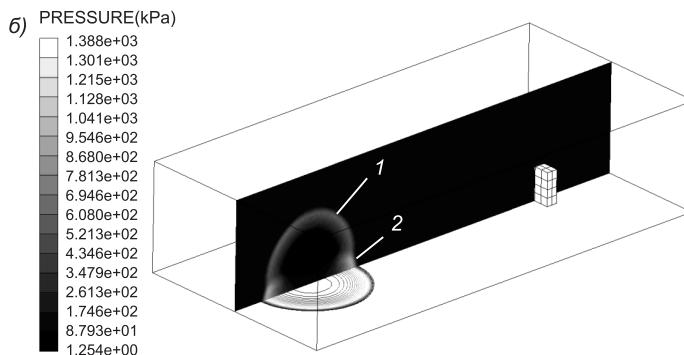


Рис. 5. Мгновенные поля статического давления  
0,018 мс (а); 0,13 мс (б); 0,36 мс (в); 0,62 мс (г);



на характерные моменты времени:

2,4 мс (б); 2,6 мс (г); 2,8 мс (е); 3,1 мс (з)

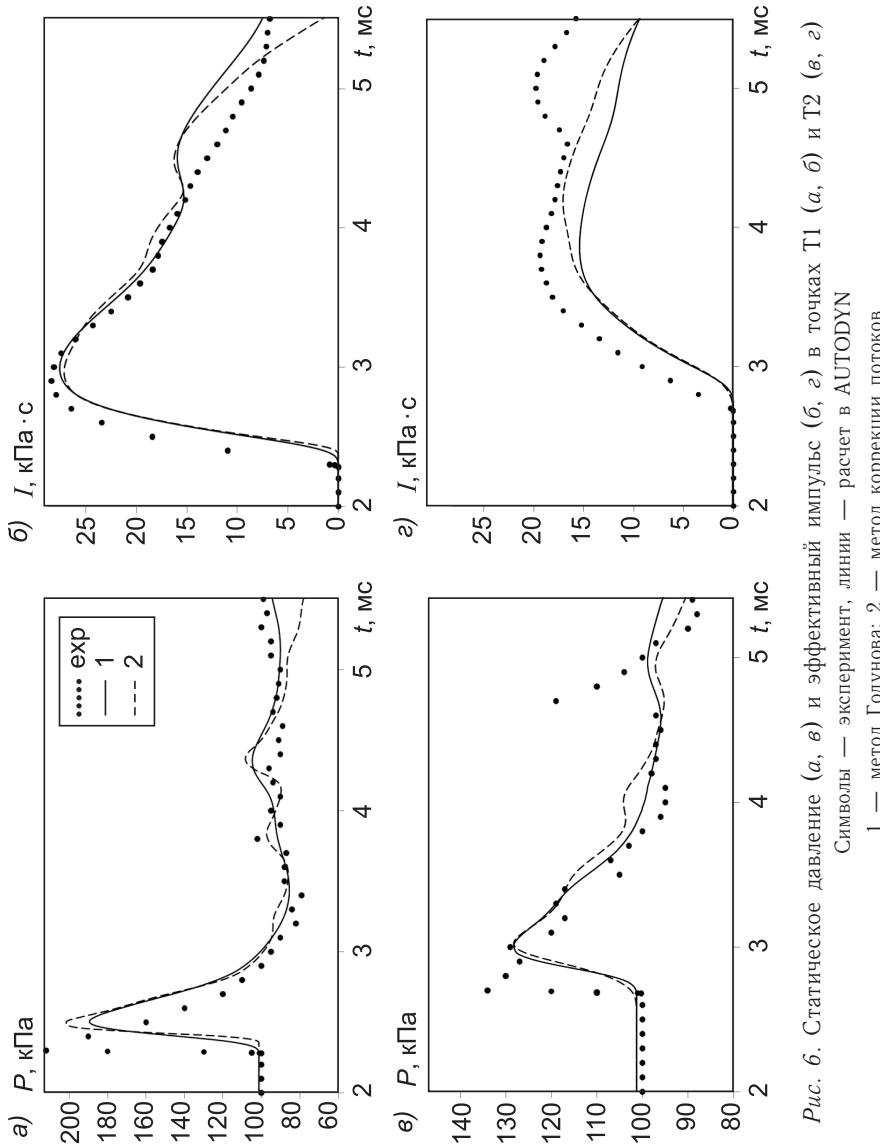


Рис. 6. Статическое давление (а, в) и эффективный импульс ( $\delta$ , г) в точках Т1 (а, в) и Т2 (в, г)

Символы — эксперимент, линии — расчет в AUTOODYN

1 — метод Годунова; 2 — метод коррекции потоков

Характер воздействия ударно-волновых структур на стенки призмы можно оценить по зависимости статического давления  $P(t)$  и эффективного импульса

$$I(t) = \int_0^t (P(\tau) - P_0) d\tau,$$

где  $P_0 = 1$  атм.

На рис. 6 показаны зависимости статического давления и эффективного импульса от времени в точках Т1 и Т2, полученные с использованием схемы Годунова (1) и коррекции потоков (2).

На фронтальной поверхности призмы видно несколько локальных максимумов давления (рис. 6, а). Первый пик  $P_{max} \approx 205$  кПа, обусловленный падением УВ (2) от стенки призмы, наблюдается при  $t \approx 2,6$  мс. Вто-

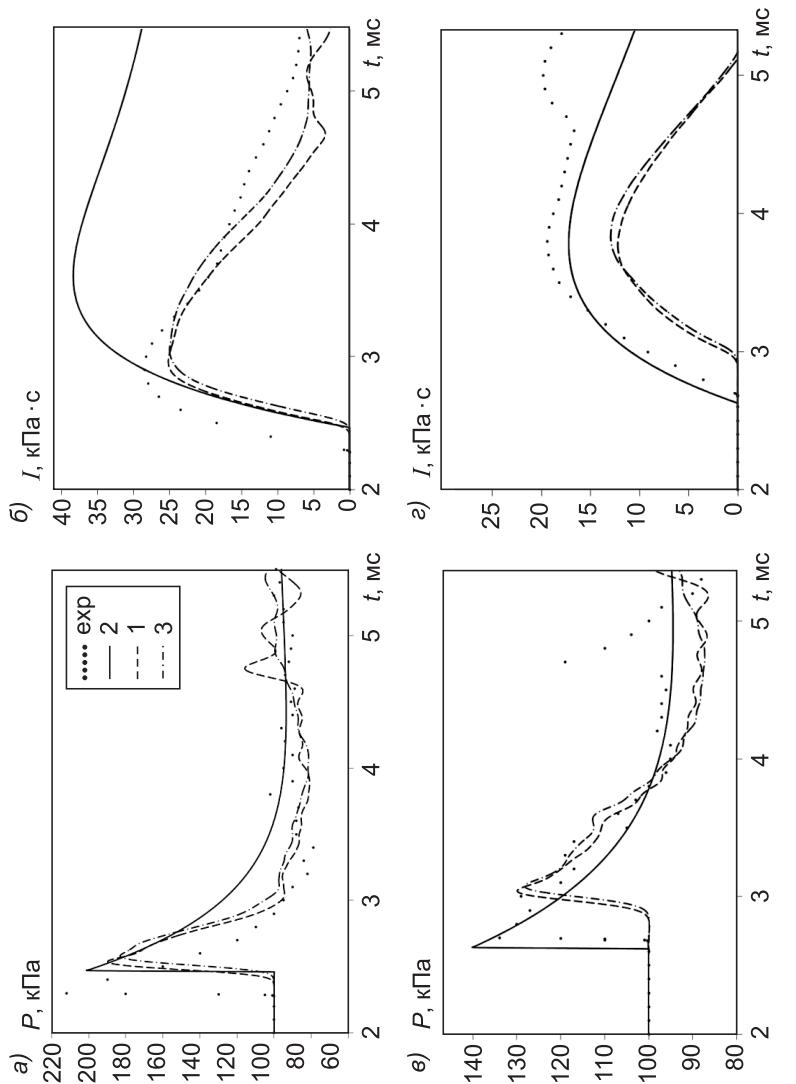


Рис. 7. Статическое давление (а, в) и эффективный импульс ( $\delta$ , г) в точках Т1 (а, б) и Т2 (в, г)  
Символы — эксперимент, линии — расчет в LS-Dyna  
1 — гидродинамический подход; 2 — эмпирический, 3 — комбинированный

рой пик давления ( $t \approx 4,7$  мс,  $P_{\max} \approx 102$  кПа) связан со вторичным отражением от фронтальной стенки призмы УВ, инициированной взаимодействием ударных волн (3) и (4) и отраженной от поверхности земли. Стоит заметить, что численные расчеты в AUTODYN с использованием обеих расчетных схем несколько занижают пики давления на наветренной и подветренной сторонах призмы и дают задержку во времени прихода первого пика УВ на 0,2 мс в точке Т1 и 0,3 мс в точке Т2. Зависимость статического давления от времени на подветренной стороне призмы изображена на рисунке 6, в. Первый пик давления связан с воздействием обогнувшей призму первой УВ. Второй пик, обусловленный воздействием этой же УВ, отразившейся от подложки, недопредсказан обеими схемами. Следствием этого является небольшое занижение эффективного импульса в точке Т2. Предсказание же этого параметра в точке, расположенной на фронтальной поверхности, можно считать удовлетворительным.

**Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных по величине максимального относительного статического давления и времени прихода ударной волны на стенку призмы**

Показатель	T1		T2	
	Максимальное относительное статическое давление, кПа	Время, мс	Максимальное относительное статическое давление, кПа	Время, мс
Эксперимент [13]	110	2,4	35	2,9
Расчет в AUTODYN	105	2,6	30	3,1
Расчет в LS-DYNA	100	2,7	30	3,2

Сопоставление графиков показывает, что расчет с использованием метода коррекции потоков позволяет более точно предсказать пиковое давление и эффективный импульс по сравнению со схемой Годунова и с большей точностью разрешить вторичные максимумы давления. Расхождения с экспериментом связаны, в первую очередь, с недостаточным сеточным разрешением и диссилиативными свойствами разностных схем. Тем не менее, количественное сравнение расчетных и экспериментальных данных, приведенное в таблице, можно считать удовлетворительным.

**7. Результаты расчетов в модуле LS-DYNA.** На рис. 7 показаны зависимости относительного статического давления от времени в точках T1 и T2.

Расчеты в LS-DYNA с использованием гидродинамического и комбинированного подходов (кривые 1, 3 на рис. 7) предсказывают пики давления на наветренной и подветренной сторонах призмы с 10%-й погрешностью и опоздание времени прихода пика ударной волны на стенку на 0,2 мс в точке T1 и 0,4 мс в точке T2.

Результаты расчетов с помощью полуэмпирической функции CONWEP (кривая 2) хорошо согласуются с экспериментальными данными по максимальным давлениям и времени прихода УВ. Этот подход дает возможность точно определить пиковое значение взрывной нагрузки на исследуемую конструкцию. Однако, как видно из рис. 7, в, данный метод не позволяет выявить вторичные и отраженные ударные волны в структуре течения и не может быть применим для сложной конфигурации застройки, когда на распределение давления на стенках объектов существенно влияют сложные интерференционные эффекты.

Преимуществом данного метода перед гидродинамическим является скорость вычисления давления на стенки конструкции. Однако этот метод дает значительную погрешность при расчете давления в точке T2, поскольку не учитывает эффекты «затенения» УВ объектами, лежащими на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции.

Гидродинамический и комбинированный методы дают близкие результаты по профилю давления в точках T1 и T2. Однако первый подход позволяет разрешить вторичные пики более точно.

Комбинированный подход существенно сокращает время расчета по сравнению с гидродинамическим подходом. Однако применение комбинированного подхода возможно лишь для некоторых простых случаев, когда

имеется возможность заменить часть расчетной области, включающей заряд ВВ, на соответствующее граничное условие.

Сопоставление результатов расчетов (см. таблицу), проведенных на одинаковых сетках в модулях LS-DYNA и AUTODYN с использованием различных подходов и численных методов, показало, что расчет в AUTODYN лучше предсказывает пики давления, чем аналогичный расчет в LS-DYNA, и дает существенно более хорошее согласование с экспериментом по времени распространения ударных волн.

**8. Выводы.** 1. На основе современного пакета компьютерной инженерии ANSYS (модули LS-DYNA и AUTODYN) разработана вычислительная технология для решения задач о взрывном воздействии на строительные конструкции.

2. Проведено тестирование данной расчетной технологии на задаче взрывного воздействия на отдельно стоящую призму. Сравнение данных расчетов в рамках различных подходов и различных программных средств показало, что ПК ANSYS (модули LS-DYNA и AUTODYN) позволяет проводить численное моделирование процессов взрывного воздействия на строительные конструкции с приемлемой точностью.

3. Эмпирическая функция CONWEP и основанный на ее использовании комбинированный подход позволяют достаточно точно предсказать максимальные пики давления и время прихода УВ на конструкцию для простых конфигураций. Однако этот метод не моделирует «отрицательную» фазу воздействия и вследствие этого дает большую погрешность в предсказании эффективного импульса. Упрощенные эмпирические методы также не могут быть использованы в случае сложных конфигураций, включающих два объекта или более.

4. Метод коррекции потоков (модуль AUTODYN) более точно предсказывает пики давления и время прихода УВ по сравнению с методом Годунова.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ANSYS Inc. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.ansys.com> (Дата обращения: 16.09.2014).
2. LS-DYNA. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.lstc.com> (Дата обращения: 16.09.2014).
3. Вальгер, С.А. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent [Текст] / С.А. Вальгер, А.В. Федоров, Н.Н. Федорова // Вычислительные технологии. — 2013. — Т. 18, № 3. — С. 27–41.
4. Данилов, М.Н. Моделирование воздействия взрыва на конструкцию в программе LS-DYNA [Текст] / М.Н. Данилов, Н.Н. Федорова, А.В. Федоров // Динамика многофазных сред : материалы XIII Всерос. семинара (Новосибирск, 8–10 окт. 2013 г.) / под ред. В.М. Фомина, А.В. Федорова. — Новосибирск : ООО «Параллель», 2013. — С. 42–45.
5. Вальгер, С.А. Математическое моделирование ударно-волновых воздействий на здания и сооружения с использованием ПК AUTODYN [Текст] / С.А. Вальгер, А.В. Федоров, Н.Н. Федорова // Динамика многофазных сред : материалы XIII Всерос. семинара (Новосибирск, 8–10 окт. 2013 г.) / под ред. В.М. Фомина, А.В. Федорова. — Новосибирск : ООО «Параллель», 2013. — С. 23–25.
6. Fedorov, A.V. Computations of wind environment and shock wave impact on the civil engineering constructions with computer aid engineering methods [Текст] / A.V. Fedorov,

- N.N. Fedorova, M.N. Danilov, S.A. Valger // Proc. of 2012 Joint Symp. NSC-SB RAS. Taiwan — Russia Bilateral Symp. on Civil Eng. Taipei. — Taiwan : R.O.C., 2012. — P. 2–30.
7. Rose, T.A. An approach to the evaluation of blast loads on finite and semi-infinite structures: PhD thesis, Engineering Systems department [Текст] / T.A. Rose ; Cranfield University, Royal Military College of Science. — Granfield, 2001. — 305 p.
  8. Dobratz, B.M. LLNL explosives handbook properties of chemical explosives and explosive simulants [Текст] / B.M. Dobratz, P.C. Crawford ; University of California. — Livermore, 1981. — Rept. UCRL-52997. — 525 p.
  9. Баум, Ф.А. Физика взрыва [Текст] / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович, В.П. Чельышев, Б.И. Шехтер. — М. : Наука, 1975. — 704 с.
  10. Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. — М. : Наука, 1976. — 400 с.
  11. Van Leer, B.J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method [Текст] / B.J. Van Leer // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 32, N 1. — P. 101–136.
  12. Zalesak, S.T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids [Текст] / S.T. Zalesak // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 31. — P. 335–362.
  13. Hyde, D. Microcomputer programs CONWEP and FUNPRO – Applications of TM 5-855-1 [Текст] / D. Hyde. — U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station. — Vicksburg, 1988. — 40 p.
  14. Kingery, C.N. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst [Текст] / C.N. Kingery, G. Bulmash. — Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984. — 84 p.
  15. Randers-Pehrson, G. Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D [Текст] / G. Randers-Pehrson, K.A. Bannister // ARL-TR-1310, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. — Aberdeen, 1997. — 73 p.
  16. U.S. Department of the army, fundamentals of protective design for conventional weapons, Technical manual 5-855-1 [Текст]. — Washington, 1986. — 125 p.
  17. Remennikov, A.M. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries [Текст] / A.M. Remennikov, T.A. Rose // Computers and Structures. — 2005. — Vol. 83, N 27. — P. 2197–2205.
  18. Ngo, T. Blast loading and blast effects on structures — an overview [Текст] / T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay // EJSE international special issue: Loading on structures. — 2007. — P. 76–91.

**ВАЛЬГЕР Светлана Алексеевна, мл. науч. сотр.; E-mail: swetla-ya@mail.ru**  
**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**

**ДАНИЛОВ Максим Николаевич, мл. науч. сотр.; E-mail: danilov-m-n@ya.ru**  
**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**

**ФЕДОРОВА Наталья Николаевна, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: nfed@itam.nsc.ru**  
**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**

**ФЕДОРОВ Александр Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.;**  
**E-mail: fedorov@itam.nsc.ru**  
**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск**

Получено 20.10.14

**Valger Svetlana Alekseevna**, junior researcher; E-mail: swetla-ya@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Danilov Maksim Nikolaevich**, junior researcher; E-mail: danilov-m-n@ya.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Fedorova Natalya Nikolayevna**, doctor of physics and mathematics sciences, professor; E-mail: nfed@itam.nsc.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Fedorov Aleksander Vladimirovich**, doctor of physics and mathematics sciences, professor; E-mail: fedorov@itam.nsc.ru, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia

## **THE COMPARISON OF RESULTS OF SIMULATION OF SHOCK WAVE ACTION ON STRUCTURES USING ANSYS AND AUTODYN AND LS-DYNA SOFTWARE**

The paper is devoted to the numerical solution of the problem of shock wave impact on a simple prismatic structure using computer engineering software package ANSYS. The methodology for solving the problem of determination of dynamic loads on structures using modules AUTODYN and LS-DYNA is developed and described. For the calculation of explosive load on the structure was used two approaches: simulation of the detonation of high explosive material and the subsequent propagation of the blast wave (hydrodynamic approach), and an approach based on the use of empirical functions (simplified approach), as well as their combination. The comparison of the results with the available experimental data was performed.

**Key words:** explosion, blast, shock-wave, software systems, ANSYS, AUTODYN, LS-DYNA.

### **REFERENCES**

1. <http://www.ansys.com> (date of access: 16.09.2014).
2. <http://www.lstc.com> (date of access: 16.09.2014).
3. Valger, S.A. Simulation of incompressible turbulent flows in the vicinity of bluff bodies using ANSYS Fluent software [Text] / S.A. Valger, A.V. Fedorov, N.N. Fedorova // Computational Technologies. — 2013. — Vol. 18, N 3. — P. 27–41.
4. Danilov, M.N. Modeling of the impact of the explosion on the structure using LS-DYNA software [Text] / M.N. Danilov, N.N. Fedorova, A.V. Fedorov // Dynamics of Multiphase Media: Proceedings of XIII All-Russian Seminar (Novosibirsk, October 8–10, 2013) / Ed. V.M. Fomin, A.V. Fedorov. — Novosibirsk : OOO «Parallel», 2013. — P. 42–45.
5. Valger, S.A. Mathematical modeling of shock-wave effects on buildings and structures using AUTODYN software [Text] / S.A. Valger, A.V. Fedorov, N.N. Fedorova // Dynamics of Multiphase Media: Proceedings of XIII All-Russian Seminar (Novosibirsk, October 8–10, 2013) / Ed. V.M. Fomin, A.V. Fedorov. — Novosibirsk : OOO «Parallel», 2013. — P. 23–25.
6. Fedorov, A.V. Computations of wind environment and shock wave impact on the civil engineering constructions with computer aid engineering methods [Text] / A.V. Fedorov, N.N. Fedorova, M.N. Danilov, S.A. Valger // Proc. of 2012 Joint Symp. NSC-SB RAS. Taiwan — Russia Bilateral Symp. on Civil Eng. Taipei. — Taiwan : R.O.C., 2012. — P. 2–30.
7. Rose, T.A. An approach to the evaluation of blast loads on finite and semi-infinite structures: PhD thesis, Engineering Systems department [Text] / T.A. Rose ; Cranfield University, Royal Military College of Science. — Granfield, 2001. — 305 p.
8. Dobratz, B.M. LLNL explosives handbook properties of chemical explosives and explosive simulants [Text] / B.M. Dobratz, P.C. Crawford ; University of California. — Livermore, 1981. — Rept. UCRL-52997. — 525 p.
9. Baum, F.A. Physics of explosion [Text] / F.A. Baum, L.P. Orlenko, K.P. Stanukovich, V.P. Chelyshev, B.I. Shaepter. — M. : Nauka, 1975. — 704 p.

10. Godunov, S.K. Numerical solution of multi-dimensional gas dynamics problems [Text] / S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.Ya. Ivanov, etc. — M. : Nauka, 1976. — 400 p.
  11. Van Leer, B.J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method [Text] / B.J. Van Leer // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 32, N 1. — P. 101–136.
  12. Zalesak, S.T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids [Text] / S.T. Zalesak // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 31. — P. 335–362.
  13. Hyde, D. Microcomputer programs CONWEP and FUNPRO – Applications of TM 5-855-1 [Text] / D. Hyde. — U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station. — Vicksburg, 1988. — 40 p.
  14. Kingery, C.N. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst [Text] / C.N. Kingery, G. Bulmash. — Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984. — 84 p.
  15. Randers-Pehrson, G. Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D [Text] / G. Randers-Pehrson, K.A. Bannister // ARL-TR-1310, U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, Aberdeen, 1997. — 73 p.
  16. U.S. Department of the army, fundamentals of protective design for conventional weapons, Technical manual 5-855-1 [Text]. — Washington, 1986. — 125 p.
  17. Remennikov, A.M. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries [Text] / A.M. Remennikov, T.A. Rose // Computers and Structures. — 2005. — Vol. 83, N 27. — P. 2197–2205.
  18. Ngo, T. Blast loading and blast effects on structures — an overview [Text] / T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay // EJSE international special issue: Loading on structures. — 2007. — P. 76–91.
-

**УДК 532.542**

**Л.И. ВЫСОЦКИЙ**

## **К ВОПРОСУ О ПОНЯТИИ «ЗОНА ГЛАДКОСТЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ»**

Рассматривается проблема определения значения коэффициента Дарси при расчете трубопроводов, работающих при гидравлической зоне сопротивления. Обнаружена недопустимо большая погрешность (в десятки процентов!), допускаемая при использовании широко известных и укоренившихся в проектной и учебной практике рекомендаций в этой области. Предлагается широко обсудить представленный материал.

**Ключевые слова:** коэффициент Дарси, зоны сопротивления, гладкие стенки, критерии, формула Кольбрука.

Одной из массовых прикладных задач гидравлических расчетов является определение потерь по длине в трубопроводе круглого сечения. Они, как хорошо известно, рассчитываются с помощью формулы Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $h_l$  — потери по длине;

$\lambda$  — коэффициент Дарси;

$l$  — длина трубопровода;

$d$  — диаметр трубопровода;

$V$  — средняя скорость;

$g$  — ускорение свободного падения.

Ясно, что точность получаемых результатов определяется точностью значения коэффициента Дарси, причем проблемы возникают лишь при турбулентном режиме движения.

Полуэмпирическая теория турбулентности развивалась первоначально на анализе осредненных турбулентных течений в круглой трубе. Решающее значение имела знаменитая двухслойная модель турбулентного потока Л. Прандтля [1], согласно которой он делится на пристенный ламинарный слой и турбулентное ядро. Толщину ламинарного слоя Л. Прандтль предложил в единицах внутреннего масштаба принимать равной

$$\delta_{\text{л}} = 11,6 \frac{v}{u_*}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{л}}$  — толщина ламинарного слоя;

$v$  — кинематический коэффициент вязкости;

$u_*$  — динамическая скорость.

Л. Прандтль считал распределение скоростей в пределах ламинарного слоя линейным, а в турбулентном ядре — логарифмическим. Это озна-

чает, что вблизи стенки до расстояния от нее, равном  $\delta_*$ , существует (в безразмерных координатах) связь:

$$u^+ = y^+, \quad (3)$$

$$\text{где } u^+ = \frac{u}{u_*}; \quad y^+ = \frac{yu_*}{v};$$

$y$  — расстояние по нормали от стенки.

Наиболее сложным испытанием для гидравликов явилась оценка степени влияния на коэффициент Дарси различного рода шероховатости стенок, которая имеет многообразные формы от упорядоченной до полностью хаотичной. Многими исследователями были предложены эмпирические формулы для оценки их влияния. Обзор многих результатов можно найти в превосходной книге Ф. Форхгеймера [2]. Недостатком упомянутых формул была их применимость лишь к конкретному виду шероховатости стенок.

После опытов И. Никурадзе [3], получивших мировое признание, на примере использования искусственной однородно-песочной шероховатости были выявлены характер влияния ее на значение коэффициента Дарси и наличие некоторых зон сопротивления, которые получили наименование *гладкостенной, переходной, доквадратичной и квадратичной*. Последнее наглядно иллюстрируется графиком, известным под названием графика Никурадзе. Он приводится, практически, во всех учебниках по гидравлике.

Особое значение, а в связи с этим и углубленное внимание, было придано гладкостенной зоне сопротивления, т.е. зоне, в которой при наличии шероховатости у стенок с высотой выступов, равных  $\Delta$ , коэффициент Дарси практически не зависит от нее и является функцией лишь числа Рейнольдса. Другими словами, коэффициент Дарси при наличии шероховатости оказывается таким же, как и при гладких стенках, т.е. при  $\Delta = 0$ .

Очевидно, что абсолютно гладких поверхностей, удовлетворяющих этому условию, в природе не существует. Ближе всего к этому понятию подходят поверхности свинцовых, медных, бронзовых, стеклянных труб, труб с шлифованными и полированными внутренними поверхностями.

В дальнейшем поверхности, коэффициент Дарси для которых не зависит от относительной шероховатости  $\Delta/d$ , стали называть *гидравлически гладкими*. Возникла проблема, как расчетным путем установить зависит или нет коэффициент Дарси от относительной шероховатости  $\Delta/d$ .

Исходя из своей двухслойной модели турбулентного потока, Л. Прандтль предложил считать, что если высота выступов шероховатости  $\Delta$  меньше или равна толщине ламинарного слоя, то они обтекаются ламинарным потоком с малыми потерями, что не оказывает влияния на коэффициент Дарси. Эта трактовка приводится в течение многих лет практически во всех учебниках по гидравлике почти одними и теми же словами, хотя никаких ни теоретических, ни экспериментальных подтверждений этого постулата не существует.

Так как по Л. Прандтлю толщина ламинарного слоя рассчитывается соотношением (2), то отсюда получается критерий для определения гладкостенной зоны сопротивления по Л. Прандтлю:

$$\Delta_r \leq 11,6 \frac{v}{u_*}. \quad (4)$$

Т. Карман [4] внес существенную реконструкцию в строение пограничного слоя. В частности, толщину ламинарного слоя он сократил до  $\delta_l = 5v/u_*$ . Он, как и Л. Прандтль, считал распределение скоростей в ламинарном слое линейным. М.А. Михалёв [5] условия Т. Кармана и Л. Прандтля трактует своеобразно. Он полагает, что условие Т. Кармана относится к  $\Delta_r$ , которое не может быть более  $5 v/u_*$ . Отсюда он получил, что

$$\Delta_r < 0,43\delta_l. \quad (5)$$

Это означает, что М.А. Михалёв продолжает поддерживать гипотезу Л. Прандтля о существовании ламинарного слоя.

При  $y > 70 v/u_*$  распределение скоростей задается логарифмическим законом. Это предложение было признано гидравлическим сообществом и сформулировано, например, Г. Шлихтингом [6] следующим образом: «...мы имеем

при  $\frac{yu_*}{v} < 5$  чисто ламинарное трение;

при  $5 < \frac{yu_*}{v} < 70$  ламинарно-турбулентное трение;

при  $\frac{yu_*}{v} > 70$  чисто турбулентное трение».

По мере развития полуэмпирической теории турбулентности и, в особенности, благодаря мощному развитию измерительной техники стало ясно, что предложенный Л. Прандтлем пограничный слой в круглых трубах в природе не существует. Это было убедительно продемонстрировано опытами Ж. Конт-Белло [7] и др. Отрицание существования ламинарного слоя в круглых трубах зафиксировано в литературных источниках высокого уровня. Например, в [8] находим высказывание о характере течения в ламинарном подслое: «...течение в нем все же не является ламинарным, а сопровождается заметными турбулентными пульсациями. Поэтому в настоящее время термин “ламинарный подслой” представляется мало удачным».

У Д.В. Штеренлихта [9] указывается: «Раньше считали, что в пределах этого тонкого слоя движение полностью ламинарное, пульсации в нем отсутствуют, и поэтому рассматриваемый слой назвали ламинарной пленкой. Однако теперь установлено, что пульсации скорости, давления и касательного напряжения передаются и в вязкий подслой, так что говорить о полностью ламинарном характере движения в вязком подслое не следует».

Тем не менее, схема Л. Прандтля многим показалась настолько наглядной и убедительной, что большинство авторов учебников, не специализирующихся в области турбулентности, до сих пор предлагают учащимся этот устаревший постулат, т. е. попросту вводят их в заблуждение.

Что же изменилось в процедуре определения значения коэффициента Дарси? Оказывается ничего. Изменение носит лишь терминологический характер. *Ламинарный слой* (или подслой) был переименован в *вязкий подслой*. Все остальные критерии по определению толщины этого слоя и границы гладкостенного сопротивления остались теми же.

За истекшее время, пожалуй, появилось одно крайне важное предложение: выражать любую шероховатость стенок труб через эквивалентную равнозернистую (*никирадзеву*) шероховатость, при которой потери по длине в данном трубопроводе при квадратичной зоне сопротивления оказываются равными потерям по Никирадзе. При выполнении сопутствующих процедур требуется определение условного диаметра трубы с шероховатой поверхностью стенок. Это реализуется, как правило, объемным или, точнее, весовым способом.

Дальнейшие операции по определению эквивалентной шероховатости, к сожалению, содержат малозаметную методологическую погрешность, которая подробно проанализирована в [10, 11]. К счастью, оказалось, что она приводит к заметным погрешностям лишь при значительных относительных шероховатостях  $\Delta_s/d$  ( $\Delta_s/d > 0,01$ ). Так или иначе, но введение понятия об эквивалентной шероховатости решило вопрос об идентификации величины выступов шероховатости  $\Delta_s$ . Как принято считать, наличие значения  $\Delta_s$  и критерия (Л. Прандтля или Т. Кармана) позволяет определить границу гладкостенного сопротивления и, следовательно, обосновать выбор формулы для расчета коэффициента Дарси.

Попытаемся показать, что многое в этой проблеме является надуманным, плохо обусловленным и даже противоречащим понятию о необходимости достижения в расчетах допустимой погрешности.

1. В идеальном случае после определения условного диаметра трубопровода опытным путем находится натурное значение коэффициента Дарси для заданных условий. Расчет потерь по длине после получения натурного значения коэффициента Дарси производится с максимальной точностью. Обратим внимание на то, что в этом случае никаких вопросов о зонах сопротивления не возникает.

2. При необходимости использовать расчетные методы определения потерь по длине, безусловно, требуется знать, с какой точностью они будут установлены. Обычно при технических расчетах за таковую принимается значение погрешности в 5 %.

3. Зададимся вопросом, гарантируют ли рассмотренные выше «узаконенные» рекомендации достижение такой (технической) точности? Ответ отсутствует. Чтобы его получить, выполним простой вычислительный эксперимент. Используем получившую очень широкое признание универсальную формулу Кольброка–Уайта [12], вошедшую во многих государствах в нормативные документы и вычислим с ее помощью коэффициент Дарси для гладких ( $\Delta = 0$ ) и для гидравлически гладких стенок, эквивалентная шероховатость которых соответствует условию  $\Delta_s = 5 v/u_*$  (по Т. Карману) или более жесткому  $\Delta_s = v/u_*$ , а также по критерию Л. Прандтля  $\Delta_s = 11,6 v/u_*$ . Эти данные позволяют легко определить получаемую погрешность. Соответствующие результаты приведены в таблице.

**К сопоставлению результатов определения коэффициента Дарси при различных рекомендуемых критериях оценки наличия гладкостенной зоны сопротивления**

$Re_d$	$\lambda_{\bar{a}}$ при $\Delta^+ = 0$	$\lambda$ при $\Delta^+ = 1$	%	$\lambda$ при $\Delta^+ = 5$	%	$\lambda$ при $\Delta^+ = 11,6$	%	$\Delta^+_{\bar{a}}$
2800	0,0435	0,0482	10,8	0,0602	29,2	0,0747	71,6	0,548
3000	0,0428	0,0472	10,2	0,0588	37,4	0,0727	70,0	0,550
5000	0,0376	0,0403	7,2	0,0495	31,6	0,0603	60,5	0,560
$10^4$	0,0308	0,0331	7,4	0,0399	26,2	0,0478	56,3	0,647
$1,5 \cdot 10^4$	0,0286	0,0297	3,8	0,0355	24,1	0,0422	47,7	0,680
$3 \cdot 10^4$	0,0240	0,0250	4,6	0,0295	23,0	0,0345	39,4	0,740
$5 \cdot 10^4$	0,0212	0,0221	4,2	0,0259	22,2	0,0300	41,6	0,783
$10^5$	0,0178	0,0190	6,7	0,0220	23,7	0,0259	45,5	0,845
$2 \cdot 10^5$	0,0154	0,0164	6,5	0,0189	22,7	0,0214	39,1	0,906
$5 \cdot 10^5$	0,0131	0,0138	5,4	0,0156	19,1	0,0176	34,6	0,990
$10^6$	0,0116	0,0122	5,2	0,0137	18,1	0,0153	32,0	1,055
$10^7$	0,00809	0,00841	4,0	0,00929	14,8	0,0102	26,2	1,278
$10^8$	0,00593	0,00613	3,4	0,00668	12,6	0,00723	22,0	1,525
$10^9$	0,00452	0,00466	3,1	0,00502	11,1	0,00538	18,0	1,780
$10^{10}$	0,00356	0,00365	2,5	0,00390	9,5	0,00415	13,8	2,050
$10^{11}$	0,00287	0,00293	3,5	0,00312	8,7	0,00329	14,6	2,340

**Примечание.** Заметим, кстати, что на базе формулы Кольбрука–Уайта можно легко получить способ оценки граничного значения высоты выступа шероховатости, гарантирующий получаемую при расчете коэффициента Дарси по формулам для гладких стенок заданную точность. На самом деле, пусть условием предельной погрешности является 5 %:

$$\frac{\lambda_{\bar{a}} - \lambda_{\bar{a}}}{\lambda_{\bar{a}}} = 0,05 \quad \text{или иначе} \quad \lambda_{\bar{a}\bar{a}} = 1,05 \lambda_{\bar{a}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\bar{a}}$  — соответствует гладким стенкам ( $\Delta = 0$ ), а  $\lambda_{\bar{a}\bar{a}}$  — гладкостенной зоне сопротивлений.

Формула Кольбрука–Уайта имеет вид:

$$\frac{1}{\lambda} = 4 \left[ \lg \left( \frac{\Delta}{3,7d} + \frac{2,51}{Re_d \lambda^{0,5}} \right) \right]^2. \quad (7)$$

Из нее следует, что

$$\frac{1}{\lambda_{\bar{a}}} = 4 \left[ \lg \left( \frac{2,51}{Re_d \lambda_{\bar{a}}^{0,5}} \right) \right]^2. \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda_{aa}} = 4 \left[ \lg \left( \frac{\Delta_a}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re}_d \lambda_{aa}^{0,5}} \right) \right]^2. \quad (9)$$

Подставляя  $\lambda_a$  и  $\lambda_{aa}$  в выражение (6), получим

$$\lg \left( \frac{\Delta_a}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re}_d \lambda_{aa}^{0,5}} \right) = \frac{1}{\sqrt{1,05}} \lg \left( \frac{2,51}{\text{Re}_d \lambda_a^{0,5}} \right). \quad (10)$$

Разрешая уравнение (10) относительно предельно допустимого значения относительной эквивалентной шероховатости  $\Delta_a / d$  для заданного числа Рейнольдса, получим

$$\frac{\Delta_a}{d} = 3,7 \left( \frac{2,51}{\text{Re}_d \sqrt{\lambda_a}} \right)^{0,9756} - 3,7 \left( \frac{2,51}{\text{Re}_d \sqrt{1,05 \lambda_a}} \right). \quad (11)$$

Этот результат можно было бы получить давным-давно и включить его в нормативные документы. Результаты определения  $\Delta_a / d$  с помощью формулы (11) также приведены в таблице в виде значений  $\Delta_a^+$ . Для лучшего восприятия результатов, представленных в таблице, они даны также в графической форме (рис. 1–4).

Как видим, рассматриваемая задача об условиях, когда стенка может считаться гидравлически гладкой, достаточно легко решается. Однако, как это показано в заключении, **в этом нет никакой необходимости.**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование в качестве критерия для определения границы гладкостенной зоны сопротивления общепринятого условия  $\Delta^+ = 5$  приводит к недопустимо большим погрешностям, которые по мере увеличения числа Рейнольдса убывают примерно с 30 до 9 %.

Принятие критерия в виде  $\Delta^+ = 1$  оказалось более предпочтительным. При этом уменьшение погрешности происходит в диапазоне от 10 до 3 %.

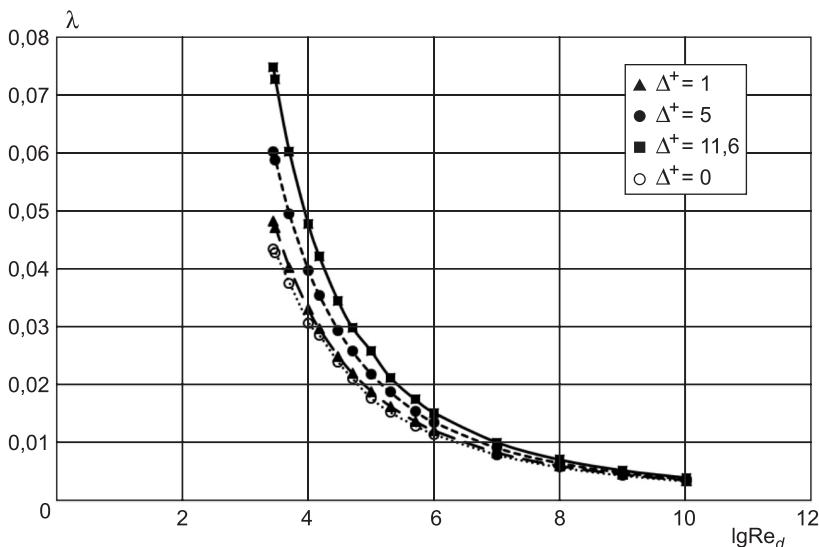


Рис. 1. Графики зависимости  $\lambda = \lambda(\lg \text{Re}_d)$

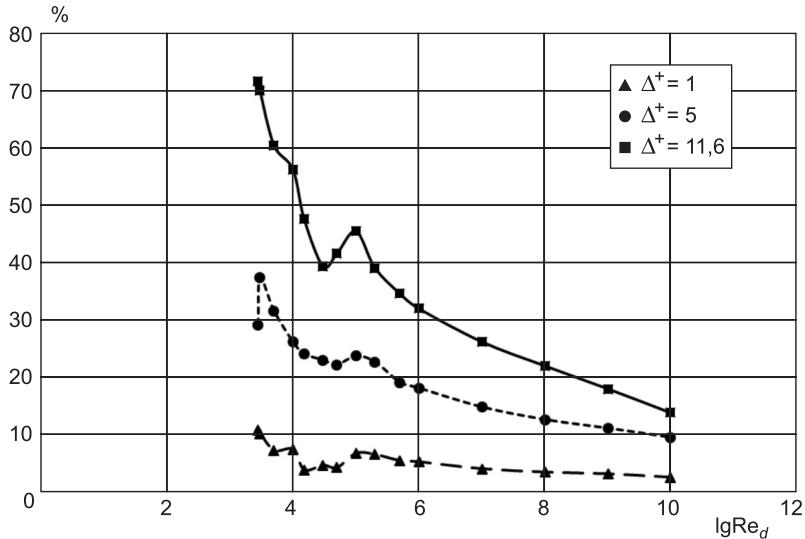


Рис. 2. Графики зависимости погрешности от  $\lg Re_d$

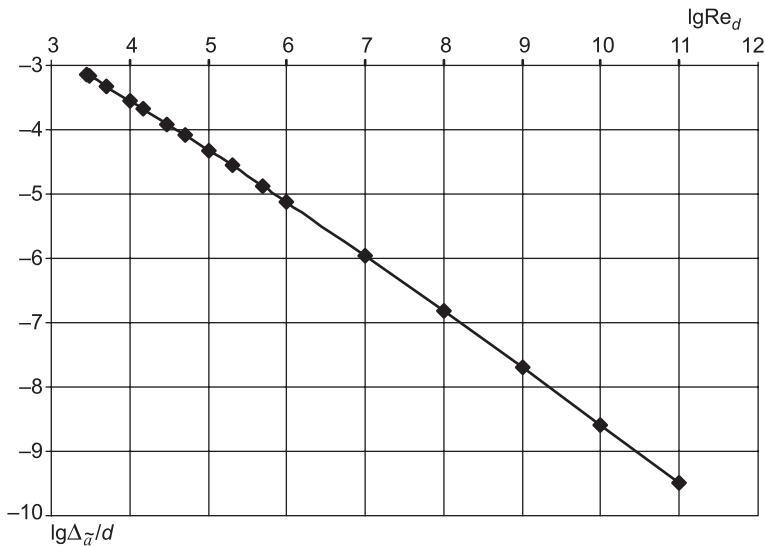


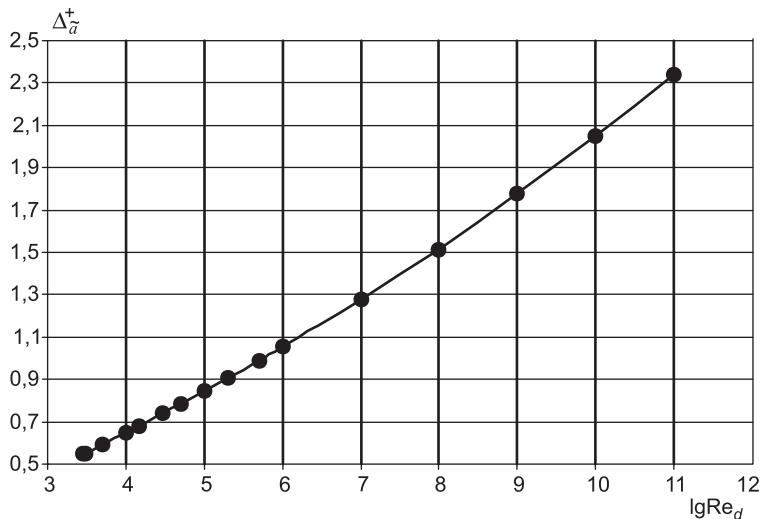
Рис. 3. График зависимости  $\lg \Delta_a / d$  от  $\lg Re_d$

Критерий Л. Прандтля  $\Delta^+ = 11,6$  приводит к недопустимым погрешностям порядка от 70 до 15 %. Тем временем в [13] принимается  $\delta_L = 11,81$  !?

При малых числах Рейнольдса зона гладкостенного сопротивления имеет место при относительной шероховатости, близкой к критерию  $\Delta_a^+ = 1$ .

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ.** Автор предлагает простой выход из рассмотренной ситуации, заключающийся в выполнении следующих, легко осуществимых, мероприятий:

а) нормативно узаконить применение универсальной формулы Кольброка–Уайта для определения значения коэффициента Дарси (до квадратичной зоны сопротивления);

Рис. 4. График зависимости  $\Delta_{\tilde{a}}^+$  от  $\lg Re_d$ 

б) вместо понятий о гладкостенной, переходной и доквадратичной зонах сопротивлений ввести одно обобщающее их понятие, которое логично назвать зоной доквадратичного сопротивления;

в) упразднить понятия ламинарный слой и вязкий подслой, с помощью которых (ввиду их наглядности и правдоподобности) внедряются ложные представления учащимся и проектировщикам;

г) внести соответствующие поправки и исправления в учебники и учебные пособия, сохранив за бытующими пока представлениями лишь историческое значение;

д) провести широкое обсуждение обнаруженного обстоятельства и найти выход из него, так как использование действующего критерия в проектной практике приводит, в конечном счете, к существенному перерасходу средств на приобретение насосов, компрессоров, расход электроэнергии и т.п.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prandtl, L. Nenere Ergebnisse der Turbulenzforschung [Текст] / L. Prandtl // V.D.I. — 1933. — B. 77, N 5. — S. 107–110.
2. Форхгеймер, Ф. Гидравлика [Текст] / Ф. Форхгеймер. — М.; Л. : ОНТИ, 1935. — 616 с.
3. Nikuradze, I. Gezetzmasskeiten dez turbulenten Stromung in glatten Rohren [Текст] / I. Nikuradse // VDI. Forschungsheft. — 1932. — N 356. — (Рус. пер. в сб.: Проблемы турбулентности / под ред. М.А. Великанова и Н.Т. Швейковского. — М.; Л. : ОНТИМ, 1936).
4. K arman, T.Y. Mechanical similarity and turbulence (in German) [Текст] / T.Y. Karman // Nachrichten von der Gesellschaften der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch Physikalische Klasse. — 1930. — S. 56–76.
5. Михалёв, М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений [Текст] / М.А. Михалёв. — СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2012. — 374 с.
6. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. — М. : Наука, 1974. — 712 с.
7. Конт-Белло, Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками [Текст] / Ж. Конт-Белло. — М. : Мир, 1968. — 176 с.

8. Монин, А.М. Статическая гидромеханика [Текст] / А.М. Монин. — М. : Наука, 1965. — Ч. 1. — 640 с.; 1967. — Ч. 2. — 720 с.
9. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 640 с.
10. Высоцкий, Л.И. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки [Текст] / Л.И. Высоцкий, И.С. Высоцкий. — Саратов : СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2011. — 560 с.
11. Высоцкий, Л.И. О проблемах, связанных с введением понятия об эквивалентной шероховатости (методологическое эссе) [Текст] / Л.И. Высоцкий // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. — Саратов : СГТУ, 2003. — С. 4–66.
12. Colebrook, C.F. Turbulence flow in pipes with particular Reference to the transition region between the smooth and rough pipe lines [Текст] / C.F. Colebrook // Journal of Institute of Civil Engineering. — 1939. — Р. 133–156.
13. Werner, H. Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel [Текст] / H. Werner, H. Wengl // 8<sup>th</sup> Symposium on turbulent shear flows. — 1991. — Р. 155–168.

*ВЫСОЦКИЙ Лев Ильич, д-р техн. наук, проф.  
Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина*

Получено 17.10.14

**Vysotsky Lev Il'ich**, doctor of technical sciences, professor, Saratov State Technical University, Russia

## **TO THE QUESTION OF THE CONCEPT «ZONE OF SMOOTH-WALLS RESISTANCE»**

The problem of determining the value of the coefficient of Darcy in the calculation pipelines working with hydraulic resistance zone. Found unacceptably large error (in the tens of percent!) permitted the use of well-known and rooted in design and educational practice recommendations in this area. It is proposed to widely discuss the material presented.

**Key words:** Darcy's coefficient, resistance zones, smooth walls, criterions, Kolbruk's formulation.

## REFERENCES

1. Prandtl, L. Nenere Ergebnisse der Turbulenzforschung [Text] / L. Prandtl // V.D.I. — 1933. — B. 77, N 5. — S. 107–110.
2. Forkhgeymér, F. Hydraulics [Text] / F. Forkhgeymér. — M.; L. : ONTI, 1935. — 616 p.
3. Nikuradze, I. Gezetzmässigkeiten dez turbulenten Stromung in glatten Rohren [Text] / I. Nikuradse // VDI. Forschungsheft. — 1932. — N 356. — (Russian translation in the collection: Problems turbulence / under M.A. Velikanov and N.T. Shveykovsky's edition. — M.; L. : ONTIM, 1936).
4. Karman, T.Y. Mechanical similarity and turbulence (in German) [Text] / T.Y. Karman // Nachrichten von der Gesellschaften der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch Physikalische Klasse. — 1930. — S. 56–76.
5. Mikhalyov, M.A. Physical modeling of the hydraulic phenomena [Text] / M.A. Mikhalyov. — St.-Petersburg : Publishing house of polytechnical university, 2012. — 374 p.
6. Shlikhting, G. Theory of boundary layer [Text] / G. Shlikhting. — M. : Nauka, 1974. — 712 p.
7. Cont-Bello, J. Turbulent flow in the channel with parallel walls [Text] / J. Cont-Bello. — M. : Meer, 1968. — 176 p.

8. Monin, A.M. Statics hydromechanics [Text] / A.M. Monin. — M. : Nauka, 1965. — P. 1. — 640 p.; 1967. P. 2. — 720 p.
  9. Shterenlikht, D.V. Hydraulics [Text] / D.V. Shterenlikht. — M. : Energoatomizdat, 1984. — 640 p.
  10. Vysotsky, L.I. Longitudinally uniform average turbulent streams [Text] / L.I. Vysotsky, I.S. Vysotsky. — Saratov : SGTU of Yu.A. Gagarin, 2011. — 560 p.
  11. Vysotsky, L.I. About the problems connected with introduction of concept about an equivalent roughness (the methodological essay) [Text] / L.I. Vysotsky // Improvement of methods of hydraulic calculations of water throughput and treatment facilities: the interuniversity nauchny collection. — Saratov : SGTU, 2003. — P. 4–66.
  12. Colebrook, C.F. Turbulence flow in pipes with particular Reference to the transition region between the smooth and rough pipe lines [Text] / C.F. Colebrook // Journal of Institute of Civil Engineering. — 1939. — P. 133–156.
  13. Werner, H. Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel [Text] / H. Werner, H. Wengl // 8<sup>th</sup> Symposium on turbulent shear flows. — 1991. — P. 155–168.
-

УДК 628.3.004.8

С.А. ШАХОВ, Н.С. КЛЮЧНИКОВА, А.С. КОЖЕМЯЧЕНКО

## СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСАДКОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ И ЗОЛ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ИХ СЖИГАНИИ

Изучен состав и технологические свойства осадков водоотведения и зол, образующихся при их сжигании. Минералогический и оксидный состав, адсорбционная активность и гидравлические свойства золы допускают ее применение в производстве вяжущих материалов в качестве корректирующих или активных добавок к портландцементному клинкеру или в производстве шлакощелочного вяжущего.

**Ключевые слова:** осадки водоотведения, зола от сжигания осадков водоотведения, химический и гранулометрический состав золы, гидравлическая активность.

**Введение.** В Российской Федерации на сооружениях по очистке сточных вод коммунального хозяйства образуется ежегодно более 2,5 млн т осадков (в расчете на сухое вещество) [1]. Основными методами утилизации осадков являются: захоронение и использование в качестве удобрений в сельском хозяйстве. Однако для захоронения осадков необходимо создавать эксплуатируемые и ремонтопригодные сооружения на срок 100–150 лет. В течение этого срока сооружения опасны для окружающей среды, а наличие тяжелых металлов сохраняет опасность и в дальнейшем. Кроме того, складирование отходов требует отчуждения больших площадей земли. Использование осадков в сельском хозяйстве из-за наличия в их составе растворимых соединений тяжелых металлов проблематично и не может быть рекомендовано без предварительного выделения из осадков тяжелых металлов. Дополнительное ограничение — патогенность коммунальных сточных вод и, соответственно, образующихся осадков [2].

Более надежным способом обезвреживания осадков является их высокотемпературное сжигание, например, в слоевых топках, факельных печах, печах с псевдоожиженным слоем инертных материалов типа песка [3, 4]. Образующаяся при сжигании осадков зола может быть эффективно использована в производстве строительных материалов: кирпича, техногенных грунтов и др. [5–10]. Вместе с тем остается малоизученным спектр вопросов, связанных с утилизацией осадков в производстве вяжущих и бетонов. С учетом этого обстоятельства целью работы являлось исследование вещественного состава и технологических свойств осадков водоотведения и зол, образующихся при их сжигании, и оценка их потенциала как сырьевого ресурса для получения вяжущих.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования в работе использовали осадки сточных вод с городской станции очистки сточных вод Новосибирска — пробы с карты № 39 (осадок с добавлением актив-

ного ила, механическим обезвоживанием с применением флокулянта ПАА). Для анализов брали усредненные пробы. Отбор и подготовка проб для химического анализа осуществлялись по ГОСТам 17.4.4.02–84, 12071–84, 28168–89.

Сжигание осадков проводили в течение часа в лабораторной печи СНОЛ при температурах 400–1200 °C. Перед сжиганием осадки сточных вод предварительно высушивали при 120 °C. Содержание влаги, летучих веществ и золы в исходном осадке и твердых продуктах сгорания определяли техническим анализом по ГОСТам 11014–2001, 6382–2001, 11022–95 соответственно.

Полуколичественный анализ минеральной составляющей осадка проводили рентгеноспектральным методом на приборе VRA-20 с флуоресцентным анализатором, рентгенофазовый анализ (РФА) — на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием Cu-K<sub>α</sub>-излучения. Для идентификации полученных дифрактограмм использовалась база данных PDF2 с оболочкой Search-Match.

Термогравиметрия и дифференциальный анализ производился на приборе Thermoscan-2 ООО «Аналитприбор». Образцы нагревались со скоростью 5 или 10 °/мин до 900 °C на воздухе. Электронные микрофотографии и элементный анализ получены на электронном микроскопе Hitachi TM-1000, оснащенном энергодисперсионным детектором TM1000 EDS.

Гранулометрический состав сырья устанавливали на лазерном анализаторе частиц «Микросайзер-201А». Содержание водорастворимых солей в растворе и водной вытяжке определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105» с использованием методик ПНД Ф 14.1:2:4.157–99 и ПНД Ф 14.1:2:4.167–2000.

**Результаты и их обсуждение.** Для очистки коммунальных стоков Новосибирска применяют весьма мощные очистные сооружения, включающие механическую, биохимическую очистку, доочистку и обезвоживание. На очистных сооружениях канализации ежесуточно обрабатывается до 700 000 м<sup>3</sup> сточных вод. Образование осадков сточных вод происходит на стадии отстаивания сточной воды в первичных отстойниках и на стадии выделения избыточного активного ила из сооружений биологической очистки и уплотнения его в гравитационных уплотнителях. Структура осадка формируется в процессе механического обезвоживания (или на иловых площадках) с удалением из осадков 80–90 % влаги в виде фильтрата иловой воды, с доведением влажности до 65–85 %. При обезвоживании происходит повышение концентрации взвешенных веществ, сопровождающееся в начальной стадии постепенным увеличением вязкости осадка на несколько порядков. По мере дальнейшего снижения влажности происходит скачкообразное возрастание вязкости осадка на несколько порядков.

Сырой осадок имеет аморфную структуру и тиксотропные свойства. На структуру и свойства образующихся осадков влияют различные факторы. Это и режим работы очистных сооружений, и способ обработки осадка, и многие другие. По данным технического анализа, основную часть сухого осадка 60–61 мас. % составляют органические вещества. Органическая часть осадка в основном представлена веществами белко-

вого происхождения (до 50 %) при содержании жиров и углеводов соответственно до 30 и 10 %. Остальные 15–20 % приходятся на долю лигногумусового комплекса соединений. Элементарный состав сухого вещества осадка колеблется в широких пределах: С — 35,4–87,8; Н — 4,5–8,7; S — 0,2–2,7; N — 1,8–8; O — 7,6–35,4.

В минеральной части осадков доминирует кремний (13,20–20,15 %) и алюминий (11,1–12,86 %). Сравнительно много железа (4,12–7,13 %), марганца (1,3–1,9 %), магния (1,2–1,8 %) и кальция (2,72–2,85 %). Помимо приведенных, в осадках сточных вод содержится ряд других соединений и микроэлементов (табл. 1).

Таблица 1. Состав минеральной части осадков по данным рентгеноспектрального флуоресцентного метода анализа

Содержание, % вес.	Элементы
10–20	Al, Si
1,0–10	Fe, Ca, Mg, Mn
0,1–1,0	Zn, Ti, K
<0,1	Zr, V, Sr, Rb, Cu, Ni, Cr, Cd, Li, Ta, Mo, Co, Ba, B, As

Дисперсная фаза осадков включает частицы органического и минерального происхождения различных размеров, форм и свойств. В свежем осадке первичных отстойников масса частиц размером более 7–10 мм составляет 5–20 %, 1–7 мм — 9–33 % и менее 1 мм — 50–88 % общей массы сухого вещества осадка. Основную массу частиц минерального происхождения образует песок с примесью глины и железистых включений в виде гидроксида железа.

По результатам термогравиметрии сырого осадка (рис. 1) основная потеря массы происходит при температуре до 200 °C и связана с удалением воды. Этой потерей массы соответствует эндотермический пик. Второй экзотермический пик с максимумом на 500 °C относится к выгоранию органических примесей осадка.

Для более детального изучения процессов, происходящих при термической обработке осадка, были отсняты кривые ТГ–ДТА для осадка, высушенного до постоянной массы при 105 °C. На кривой ДТА этого осадка имеется небольшой пик с минимумом на 150 °C, связанный с удалением химически связанной воды. Монотонная потеря массы с 200 до 500 °C по-видимому вызвана разложением органических примесей и образованием свободного углерода. Этот углерод начинает выгорать приблизительно с 650 °C, этому процессу соответствует экзотермический пик на кривой ДТА с максимумом около 700 °C.

Образующаяся при сжигании осадка зола характеризуется развитой удельной поверхностью 14173 см<sup>2</sup>/г. По химическому составу зола представляет кислое сырье с небольшим содержанием органики и включает повышенное количество красящих оксидов. По гранулометрическому составу зола характеризуется содержанием в основном пылеватой фракции. Насыпная плотность материала 640–650 кг/м<sup>3</sup>.

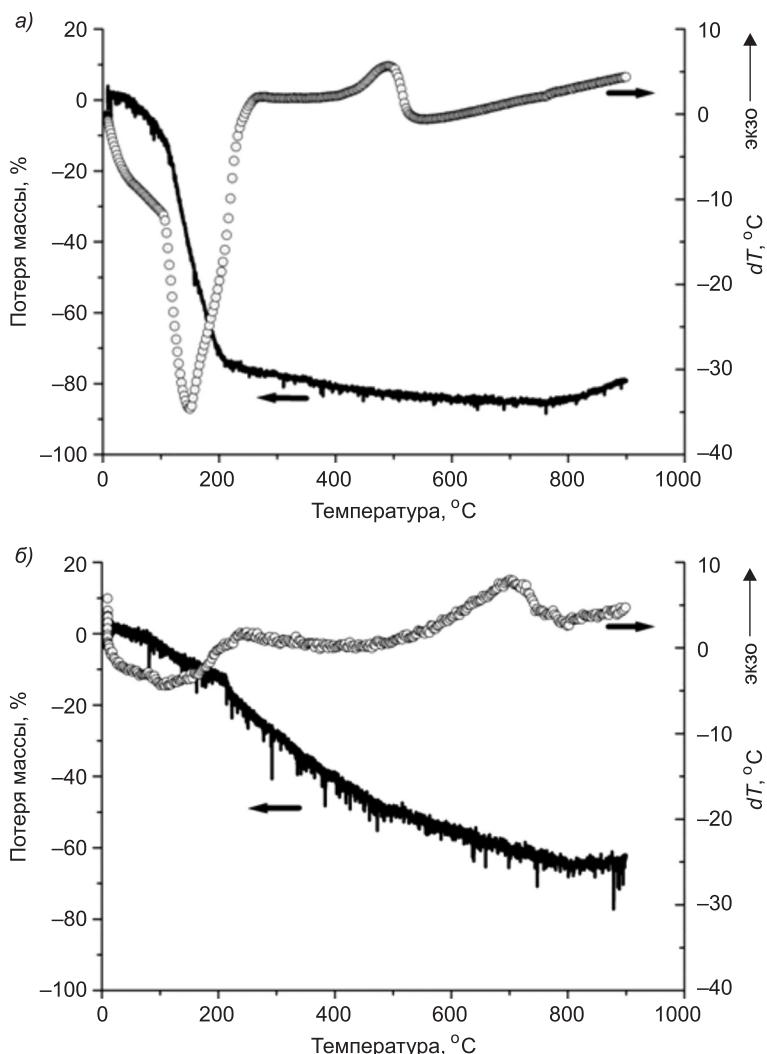


Рис. 1. Термогравиметрия и ДТА сырого (а) и высушенного (б) осадка

Рентгенограммы отожженного в течение 1 ч при температурах 400, 500, 800, 900 и 1200 °С осадка (рис. 2) свидетельствуют, что основными фазами, присутствующими в образцах, отожженных при 400 и 500 °С, являются кварц ( $d = 3,36$ ) и кальцит ( $d = 3,03$ ). С повышением температуры увеличивается степень окристаллизованности кальцита, что отражается на увеличении количества его рефлексов на рентгенограмме.

В золе, отожженной при 800 °С, образуется оксид железа (III) в виде гематита ( $d = 1,45$ ), а кальцит начинает разлагаться с образованием оксида кальция ( $d = 2,4$ ).

При увеличении температуры отжига до 900 °С исчезает оксид кальция. По-видимому, он реагирует с другими компонентами золы, образуя новое соединение, которое методом РФА отождествить не удалось.

При 1200 °С произошло расплавление осадка с образованием вспененной стеклообразной массы темно-коричневого цвета. По результатам

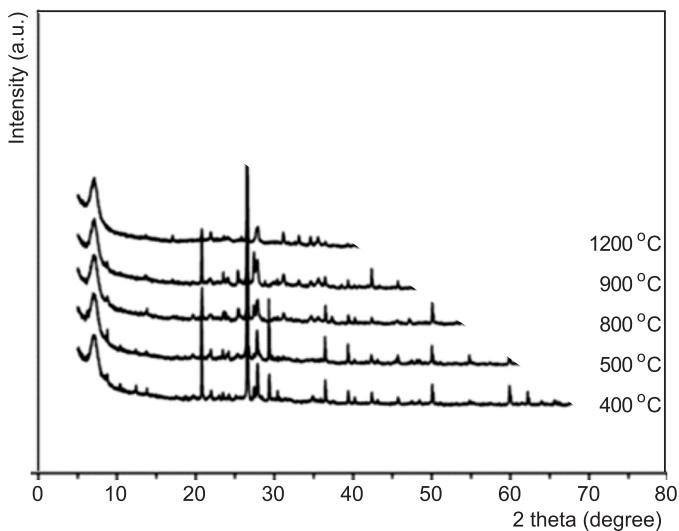


Рис. 2. Рентгенограммы золы, отожженной при различных температурах

РФА, в расплаве присутствуют кварц ( $d = 3,38$ ) и кальцит ( $d = 2,7$ ;  $d = 1,69$ ).

На основе анализа гранулометрического состава золы (рис. 3) можно сказать, что зола характеризуется широким распределением частиц по размерам. В основном в ней присутствует пылеватая фракция.

При осмотре частиц под оптическим микроскопом (рис. 4) было установлено, что большое количество частиц имеет неправильную фор-

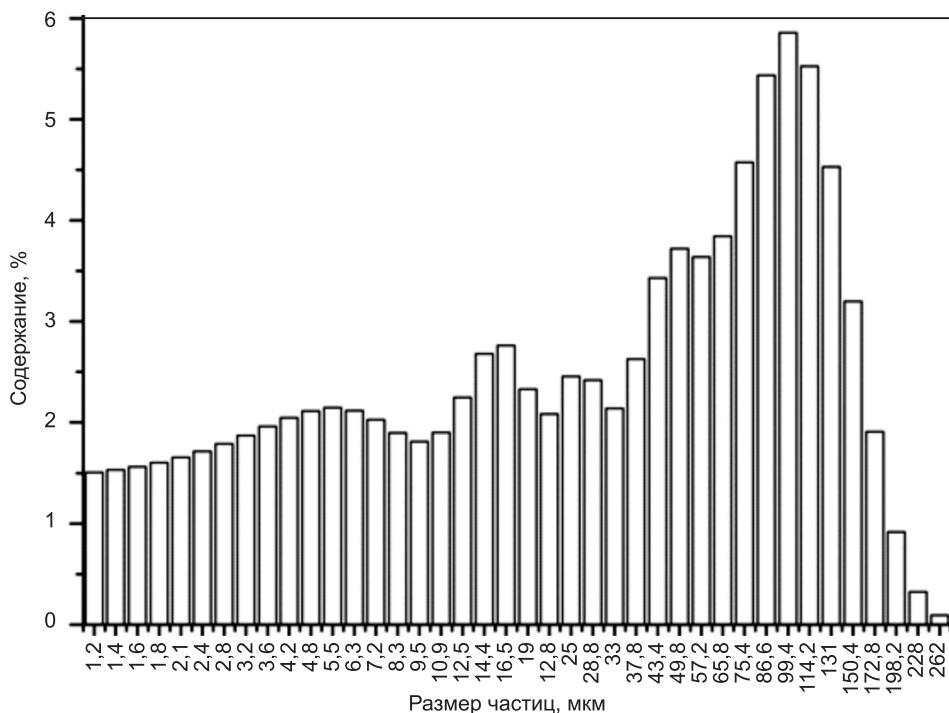


Рис. 3. Гранулометрический состав золы, отожженной при 900 °C

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в золе

Металл	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Содержание, мг / кг	11,6	55,7	21,0	259	0,01	2140	21,9	69,9	644

му, что можно объяснить агломерацией частиц при коагуляции и седиментации.

Результаты исследований структуры, формы и размера частиц золы с помощью растрового электронного микроскопа с энергетическим спектрометром показали:

— зола представлена стеклофазой в виде капелек и частиц неправильной формы размером 1–60 мкм (рис. 4, а);

— основными элементами, входящими в состав золы, являются кремний, железо и алюминий (рис. 4, б), что хорошо согласуется с результатами РФА. Также в золе в заметных количествах присутствуют калий и кальций. Следует отметить, что в данном исследовании образец для съемки помещался на подложку из алюминия, поэтому результаты содержания Al могут быть завышенными.

Содержание тяжелых металлов приведено в табл. 2. Состав золы постоянен по всему объему, и разброс значений не превосходит 16 %. Содержание меди, кадмия, никеля и цинка превышает ПДК для почвы.

Содержание водорастворимых солей, определяемое методом анализа водной вы-

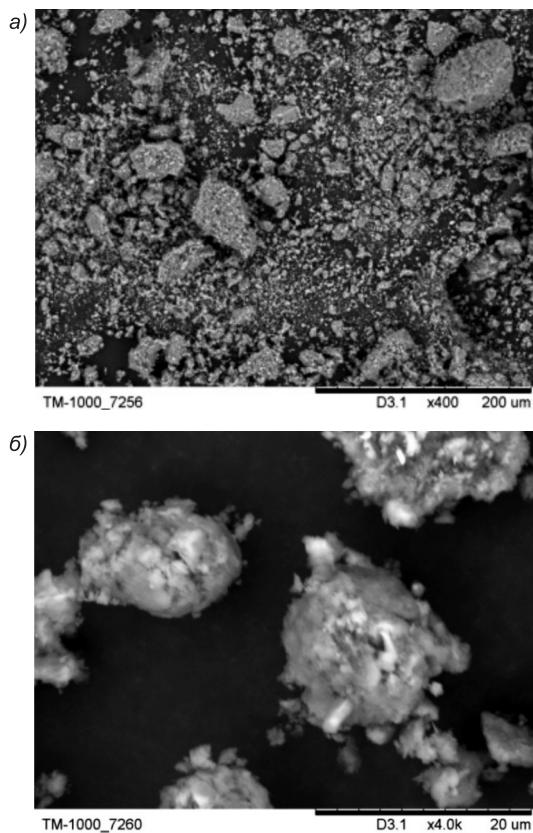
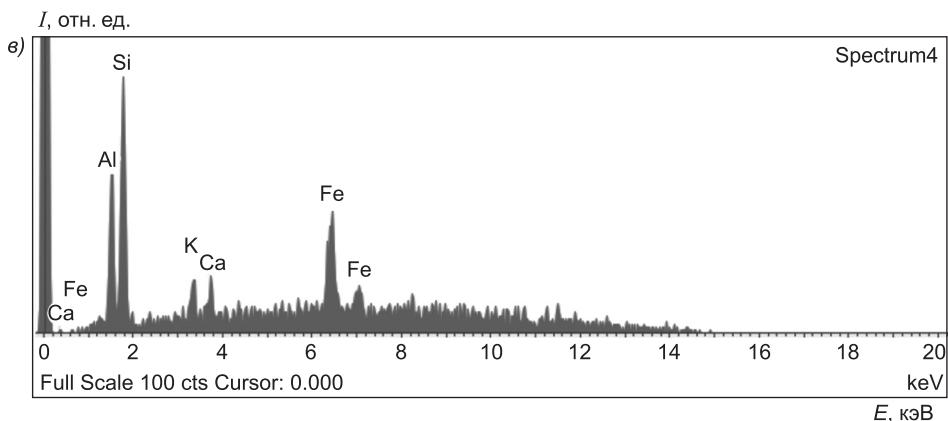


Рис. 4. Микрофотография частиц золы (а, б) и результаты элементного анализа по всей видимой области (в)



тяжки из золы, представлено в табл. 3. Исследовалась зола, отожженная при 500 и 900 °С. Для лучшего перехода водорастворимых солей в раствор колбы с золой и водой пробы выдерживались в ультразвуковой ванне в течение 10 мин.

С повышением температуры отжига уменьшается количество растворимых Mg и K, что может быть связано с вовлечением их в химические реакции. Увеличение количества Ca вызвано разложением кальцита и образованием растворимого CaO.

Известно, что сжигание твердого топлива возможно только при теплотворной способности не ниже 4000 МДж / кг. Осадок, обезвоженный до 25 % содержания вещества, в зависимости от его состава, который в свою очередь зависит от технологии очистки сточных вод, имеет теплотворную способность не выше 1500 МДж / кг [11]. Таким образом, самостоятельное горение обезвоженного осадка невозможно по термодинамическим причинам. Вместе с тем, учитывая значительное содержание органики в осадке с высокой степенью достоверности, можно предположить, что выделяющиеся при выгорании органических веществ газообразные продукты будут участвовать в процессах формирования пористой структуры золы, а теплотворная способность осадка положительно скажется на тепловом балансе процесса сжигания.

Органические вещества составляют 44–49 % от массы сухого осадка (табл. 4).

**Таблица 4. Элементный состав органической части осадков сточных вод МУП «Водоканал», г. Новосибирск (в пересчете на сухое вещество)**

Элемент	C	H	N	S	P	O	Сумма
Содержание, мас. %	35,0–40,0	4,6–4,9	1,5–2,1	0,6	0,6	16,0	60,8–64,1

Для оценки термодинамических превращений различных органических соединений, содержащихся в осадке, вся сумма органических соединений была принята за углерод (C). Расчеты проводились для следующих реакций газификации углерода:



Представленные на рис. 5, а результаты термодинамических расчетов (выполнены для условий: температурный интервал исследований 298–1000 °К, давление 1 атм) показывают, что процессы образования газовой фазы будут протекать по схеме, приведенной на рис. 5, б.

О наличии гидравлической активности породы можно судить по результатам оценки количества поглощенной извести CaO. Для этого из-

**Таблица 3. Результаты анализа водной вытяжки из золы**

Ион	Содержание ионов, мг / кг золы	
	500	900
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,26	0,23
K <sup>+</sup>	1,3	0,86
Na <sup>+</sup>	0,24	0,90
Mg <sup>2+</sup>	0,80	0,19
Ca <sup>2+</sup>	14,2	22,4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13,9	13,6

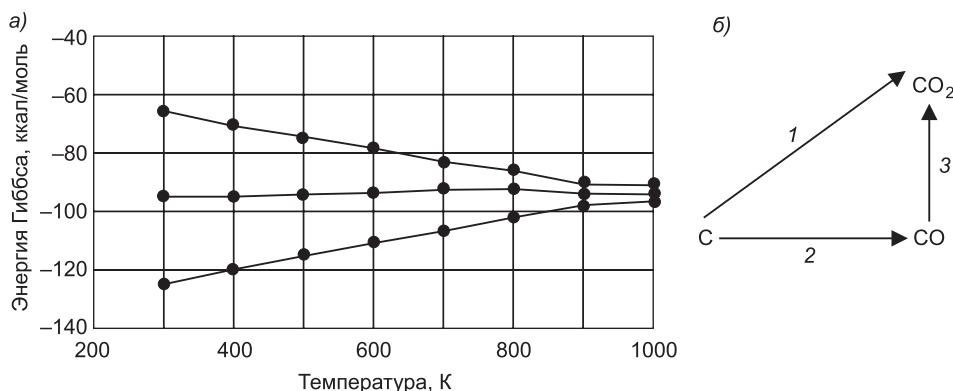


Рис. 5. Изменение энергии Гиббса от температуры (а) и схема превращения (б) при газификации углерода (1–3 номера реакций)

мелоченную навеску средней пробы золы (10 г) выдерживали в растворе CaO с исходной концентрацией 5,625 %. Концентрация CaO контролировалась во времени в процессе взаимодействия с золой методом капиллярного электрофореза. Экспериментальные результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Активность золы по поглощению CaO

Время контакта золы с раствором CaO, сут	Содержание CaO в растворе, мг/л	Величина поглощения CaO за 10 сут, мг/л	Величина поглощения CaO за 10 сут, мг/г
1	2,370	0,873	87,3
10	1,497		

Сравнение полученных данных с имеющимися в литературе показывает, что величина поглощения CaO изученных зол, хотя и существенно меньше, но все же сопоставима с количественными показателями для кислых гидравлических добавок — опаловидных пород (трепеллов, диатомитов, опок). Величина поглощения CaO для них составляет 250–400 мг/г [12]. Столь высокая поглотительная способность свидетельствует о значительной гидравлической активности и возможности использования золы в качестве активных добавок к цементному клинкеру, которые должны поглощать не менее 50 мг/г извести за 30 сут [13].

Гидравлическая активность определяется не только содержанием оксидов элементов, но и их соотношениями, которые описываются системой модулей. По величине модуля активности  $M_a = 0,35$  зола относится ко 2-му классу кислых шлаков ( $M_a \geq 0,33$ ) [14]. Величина силикатного модуля  $M_c$  для золы — 1,8. Согласно рекомендаций Ю.М. Бутта [14], для реализации отходов в производстве строительных материалов силикатный модуль  $M_c$  должен иметь оптимальные значения 1,7–3,5. Глиноземистый модуль  $M_r$  пород, используемых в производстве портландцементного клинкера, должен укладываться в интервал 1,0–2,5 [15]. Для золы его величина  $M_r = 2,06$  находится в границах указанного интервала.

**Заключение.** Результаты исследований показывают, что зола от сжигания осадков сточных вод содержит большое количество различных элементов, способных вступать в химические взаимодействия.

Полученные результаты по определению минералогического и оксидного составов, адсорбционной активности и гидравлических свойств золы обуславливают возможность ее применения в производстве вяжущих материалов в качестве корректирующих или активных добавок к портландцементному клинкеру или в производстве шлакощелочного вяжущего. С помощью таких добавок можно регулировать в определенных пределах величины модулей  $M_r$ ,  $M_c$ .

Использование отходов водоотведения позволит:

- расширить сырьевую базу;
- обеспечить стройиндустрию легкодоступным и дешевым минеральным сырьем;
- улучшить экологическую обстановку в регионе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туровский, И.С. Обработка осадков сточных вод [Текст] / И.С. Туровский. — М. : Стройиздат, 1988. — 256 с.
2. Хакимов, Ф.И. Рекомендации по утилизации илов городских очистных сооружений [Текст] / Ф.И. Хакимов, А.С. Керженцев, С.М. Севостьянов. — М. : Госкомэкология России, 1999. — 259 с.
3. Бернадинер, М.Н. Термическое обезвреживание промышленных органических отходов [Текст] / М.Н. Бернадинер, В.В. Жижин, В.В. Иванов // Экология и промышленность России. — 2000. — Апр. — С. 17–21.
4. Симонов, А.Д. Сжигание осадков сточных вод коммунального хозяйства в псевдоожиженном слое катализатора [Текст] / А.Д. Симонов, Н.А. Языков, А.В. Трачук, В.А. Яковлев // Альтернативная энергетика и экология. — 2010. — № 6 (86). — С. 61–66.
5. Беляев, А.Н. Инновационные технологии утилизации отходов [Текст] / А.Н. Беляев, Е.В. Щербакова // СтройПРОФиль. — 2010. — № 2-1-10. — С. 36–37.
6. Bottrell, P. Minimizing the sludge disposal problem [Текст] / P. Bottrell // Water and waste treat. — 1997. — Vol. 40, N 9. — P. 26.
7. Пат. 2160722 Российская Федерация, МПК C 04 B 35/10. Способ получения заполнителя [Текст] / Н.Г. Чумаченко, М.Н. Баранова, Е.А. Коренькова; заявитель и патентообладатель СамГАСА. — № 98121761; заявл. 30.11.98; опубл. 20.12.2000, Бюл. № 35.
8. А.с. 1763409 СССР, МПК C 04 B 14/12. Сыревая смесь для изготовления пористого заполнителя [Текст] / Ф.Ю. Ибадуллаев, В.Ю. Аскеров, А.Р. Гаджилы; опубл. 23.09.92.
9. А.с. 1821458 СССР, МПК C 04 B 14/12. Сыревая смесь для изготовления керамзита [Текст] / С.А. Калузская [и др.]; опубл. 15.06.93.
10. Дрозд, Г.Я. О возможности переработки осадков сточных вод в строительные материалы [Текст] / Г.Я. Дрозд, В.И. Братиун, Г.Ф. Литвинов // Водоснабжение и санитарная техника. — 1992. — № 4. — С. 8–9.
11. Рогов, В.И. Современные методы утилизации осадков сточных вод [Текст] / В.И. Рогов // Решение проблем экологической безопасности в водохозяйственной отрасли: сб. тез. докл. VI междунар. конф. / под общ. ред. Ю.Н. Похила. — Новосибирск, 2010. — С. 85–87.
12. Книгина, Г.И. Строительные материалы из горелых пород [Текст] / Г.И. Книгина. — М. : Стройиздат, 1966. — 297 с.

13. Б р я н ц е в, Б.А. Некоторые физико-химические свойства кианита месторождения Новая Шууртура и материалов на его основе [Текст] / Б.А. Брянцев, М.Е. Кононов, О.В. Поваляева // Минеральное сырье и отходы промышленности для производства строительных и технических материалов. — Л. : Наука, 1982. — С. 64–68.
14. Б у т т, Ю.М. Портландцементный клинкер [Текст] / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. — М. : Стройиздат, 1967. — 303 с.
15. Б у т т, Ю.М. Шлаковые цементы без добавок – возбудителей твердения [Текст] / Ю.М. Бутт, Е.Л. Горбаковская, Л.Д. Вайсфельд // Сб. тр. РОСНИИМС. — М. : Промстройиздат, 1953. — № 3. — С. 25–31.

*ШАХОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sashakhov@mail.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
КЛЮЧНИКОВА Наталья Сергеевна, асп.; E-mail: Natarius2020@yandex.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
КОЖЕМЯЧЕНКО Александр Сергеевич, вед. инж.  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено 27.10.14

**Shahov Sergey Aleksandrovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sashakhov@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Klyuchnikova Natalia Sergeevna**, post-graduate student; E-mail: Natarius2020@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia  
**Kozhemyachenko Aleksandr Sergeevich**, senior engineer; E-mail: zheezh@gmail.com, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **THE COMPOSITION AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SEWAGE SLUDGE AND ASHES FROM SEWAGE SLUDGE COMBUSTION**

There were studied composition and technological properties of sewage sludge and ashes resulting from the combustion of precipitation sewerage. Because of mineralogical and oxide composition, adsorption activity and hydraulic properties the ash were allowed to use in the production of binding materials as corrective or active additives to Portland cement clinker or slag alkali binder.

**Key words:** sewage sludge (precipitation sewerage), ash from sewage sludge combustion (ash from the combustion of precipitation sewerage), chemical and granulometric composition of the ash, hydraulic activity.

### **REFERENCES**

1. Turovskiy, I.S. Treatment of sewage sludge [Text] / I.S. Turovskiy. — M. : Stroyizdat, 1988. — 256 p.
2. Khakimov, F.I. Recommendations for disposal of sludge of municipal wastewater treatment facilities [Text] / F.I. Khakimov, A.S. Kerzhentsev, S.M. Sevost'yanov. — M. : The SCEP, 1999. — 259 p.
3. Bernadiner, M.N. Thermal disposal of industrial organic waste [Text] / M.N. Bernadiner, V.V. Zhizhin, V.V. Ivanov // Ecology and industry of Russia. — 2000. — Apr. — P. 17–21.
4. Simonov, A.D. Incineration of sewage sludge and municipal economy in the fluidized bed of catalyst [Text] / A.D. Simonov, N.A. Yasykov, A.V. Trachuk, V.A. Yakovlev // Alternative energy and ecology. — 2010. — N 6 (86). — P. 61–66.
5. Belyaev, A.N. Innovative technology waste management [Text] / A.N. Belyaev, E.V. Shcherbakova // Tripropyl. — 2010. N 2-1-10. — P. 36–37.

6. Bottril, P. Minimizing the sludge disposal problem [Text] / P. Bottril // Water and treat waste. — 1997. — Vol. 40, N 9. — P. 26.
  7. Pat. 2160722 Russian Federation, IPC 04 In 35/10. The method of obtaining placeholder [Text] / N.G. Chumachenko, M.N. Baranova, E.A. Korenkova; applicant and patentee of Samasa. — N 98121761; Appl. 30.11.98; publ. 20.12.2000, Bull. N 35.
  8. A. s. 1763409 the USSR, IPC From 04 To 14/12. Raw mix for the production of porous filler [Text] / F.Yu Ibadullayev, V.Yu. Askerov, A.R. Hajili; publ. 23.09.92.
  9. A. s. 1821458 the USSR, IPC From 04 To 14/12. Raw mix for the production of expanded clay [Text] / S.A. Kalutskaya [and others]; publ. 15.06.93.
  10. Drozd, G.Ya. On the possibility of recycling of sewage sludge in building materials [Text] / G.Ya. Drozd, V.I. Bratton, G.F. Litvinov // Water supply and sanitary technique. — 1992. — N 4. — P. 8-9.
  11. Rogov, V.I. Modern methods of disposal of sewage sludge [Text] / V.I. Rogov // Problems of ecological security in the water sector: collected abstracts of the VI international conference ed. Y.N. Pohela. — Novosibirsk, 2010. — P. 85-87.
  12. Knigina, G.I. Building materials from the burnt rocks [Text] / G.I. Knigina. M. : Stroyizdat, 1966. — 297 p.
  13. Bryantsev, B.A. Some physico-chemical properties of kyanite Deposit New Suuresta and materials based on it [Text] / B.A. Bryantsev, M.E. Kononov, O.V. Povalyajeva // Minerals and waste industry for manufacture of building and technical materials. — L. : Nauka, 1982. — P. 64-68.
  14. Butt, Yu.M. Portland cement clinker [Text] / Yu.M. Butt, V.V. Timashev. — M. : Stroyizdat, 1967. — 303 p.
  15. Butt, Yu.M. Slag cement without additives, curing agents [Text] / Yu.M. Butt, E.L. Gorbacovskya, L.D. Weisfeld // Sat. proceedings of ROSNIKS. — M. : Promstroyizdat, 1953. — N 3. — P. 25-31.
-

## **ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ГНУТЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ**

**В НГАСУ (Сибстрин) разработаны новые экономичные и долговечные оцинкованные металлические конструкции, которые состоят из гнутых оцинкованных С-образных профилей и оцинкованных профилированных листов. Соединения элементов конструкций выполняются с помощью высокопрочных болтов и самонарезающих винтов.**

**Основное предназначение конструкций — несущие элементы покрытий различных зданий пролетами до 18 м.**



### **ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

**Производственные, складские и сельскохозяйственные здания, а также здания спортивного, торгового назначения; гаражи и здания технического обслуживания транспорта; надстройки (манжарды) существующих жилых домов; одно-, двухэтажные жилые и нежилые здания.**

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРЕДЛОЖЕНИЯ**

- в 2 раза легче обычных неоцинкованных металлических конструкций;
- нет необходимости производить антикоррозионные мероприятия, так как оцинкованное покрытие обеспечивает сохранность конструкций на срок до 50 лет и более;
- при строительстве в удаленных районах позволит дополнительно сэкономить на транспортных расходах за счет меньшей массы и габаритов (перевозка в пакетах с последующей сборкой конструкций на стройплощадке).

**НГАСУ (Сибстрин) обеспечивает содействие по решению технических вопросов внедрения предлагаемых конструкций на всех стадиях строительства и эксплуатации здания и проведение авторского надзора.**

**Разработчик: А.В. КОРОТКИХ, канд. техн. наук**

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

**E-mail: ntio@sibstrin.ru**

**Internet: www.sibstrin.ru**

**Тел./факс: (383) 266-28-89**

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
  - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список;

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и **e-mail** авторов;

— **название статьи на английском языке**;

— **аннотация на английском языке**;

— **ключевые слова на английском языке**;

— **библиографический список на английском языке**.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстраций не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. **Русские и греческие буквы** и индексы, а также **цифры**, **аббревиатуры** и **стандартные функции** (Re, cos и др.) набираются **прямым шрифтом**. **Латинские буквы** набирать **курсивом**. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2014 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2700 р.

Цена отдельного номера — 450 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами  
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 11 (671) 2014**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*