

УДК 693.547.3

**О РЕЖИМАХ ВАКУУМИРОВАНИЯ ЗОЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ***д.т.н., проф. Приходько А.П., к.т.н., доц. Павленко Т.М.,  
студ. Аббасова А.Р.**ГВУЗ "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры"*

**Постановка проблемы.** Зола тепловых электростанций обладают очень высокой дисперсностью. Это приводит к большой водопотребности золобетонных смесей. Среднепластичные такие смеси (ОК = 3...4 см) характеризуются расходом воды до 400 л/м<sup>3</sup>.

Одним из способов уменьшения расхода воды и, соответственно, повышения физико-механических свойств золобетонов является вакуумная обработка бетонной смеси при формовании изделий (конструкций).

Однако при вакуумировании таких смесей в первый период процесса у вакуумщита образуется запирающий слой, который резко замедляет процесс вакуумирования. По нашему мнению, для устранения этого недостатка должен быть режим вакуумной обработки с постепенно изменяющейся величиной разрежения, а при применении оптимального управления режимом формования должен использоваться режим с периодически изменяющейся величиной разрежения (давления) в вакуумполости вакуумщита.

Касаясь теоретических разработок в рассматриваемой области, следует отметить следующее. Достаточно хорошо изучен процесс вакуумной обработки бетонных смесей при постоянной величине разрежения (давления) в вакуумполости вакуумщита. Другие режимы практически не исследованы. Исходя из этого, настоящая работа посвящена исследованию режимов вакуумирования, в которых величина разрежения (давления) в вакуумполости вакуумщита постепенно возрастает по заданному режиму или является периодически изменяющейся (является гармонической функцией).

**Анализ публикаций.** Эффективность использования способа вакуумной обработки существенно зависит от знания закономерностей распределения разрежения в уплотняемой вакуумированием бетонной смеси. Совместным решением уравнения движения извлекаемой при вакуумировании воды, уравнений неразрывности и состояния получено уравнение вакуумной обработки бетонной смеси при постоянном давлении в вакуумполости вакуумщита [1]:

$$\frac{K}{K_{\text{п}}\beta_{\text{г.с.}}\mu} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} \right) = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

$P$  – давление в бетонной смеси на расстоянии  $X$  от поверхности вакуумщита (фильтра);

$t$  – время вакуумной обработки;

$\mu, K$  – соответственно, вязкость воды и коэффициент фильтрации;  
 $K_{\Pi}$  – коэффициент, зависящий от удобоукладываемости бетонной смеси ( $K_{\Pi} = 0,95 \dots 1,00$ );  
 $\beta_{\text{б.с.}}$  – коэффициент объемной сжимаемости бетонной смеси:

$$\beta_{\text{б.с.}} = \frac{V_a - V}{V_a(P - P_a)},$$

$V_a$  – объем жидкости при атмосферном давлении  $P_a$ ;  
 $V$  – то же, при давлении  $P$ .

Обозначив выражение при  $\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}$  через  $a$ , получим уравнение вакуумирования бетонной смеси в следующем виде:

$$a \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (2)$$

$a$  – коэффициент пьезопроводности.

Это уравнение параболического типа аналогично уравнению теплопроводности, которое достаточно хорошо исследовано, разработано несколько методов его решения. Следовательно, имеется возможность по заданным начальным и граничным условиям, используя методы решения уравнения теплопроводности, решить задачу о вакуумировании бетонной смеси (предварительно уложенной вибрационным способом).

Используемые в дальнейшем аналитические методы для решения задач получили свое первоначальное развитие в работах Фурье, которые посвящены исследованиям по теории теплопроводности [2, 3]. Эти методы многими авторами распространены и на другие области математической физики, они получили свое дальнейшее развитие в классической механике, где рассматриваются независимо от их физического содержания [4, 5].

Общим решением дифференциального уравнения (2), удовлетворяющего условиям: при  $t = 0, P = \Phi(X)$ , а для  $t > 0$   $P$  во всем пространстве, конечно, непрерывно, непрерывно-дифференцируемо, является:

$$P = \frac{1}{2\sqrt{a\pi t}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\varepsilon) e^{-\frac{(\varepsilon-X)^2}{4at}} d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – глубина распространения границы вакуумирования (рис. 1).

В случае если на отрезке  $0 < \varepsilon < +\infty$   $\Phi(X) = \text{const}$  при  $t = 0$ , то:

$$P = A + B\psi\left(\frac{X}{2\sqrt{at}}\right). \quad (4)$$

Через  $\psi$  обозначен интервал Гаусса:

$$\psi\left(\frac{X}{2\sqrt{at}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} e^{-\frac{x^2}{4at}} dx, \quad (5)$$

где  $A, B$  – произвольные постоянные.

Обычно исследователи физические величины с индексом 1 относили к провакуумированной, а с индексом 2 – к не провакуумированной бетонной смеси (рис. 1).

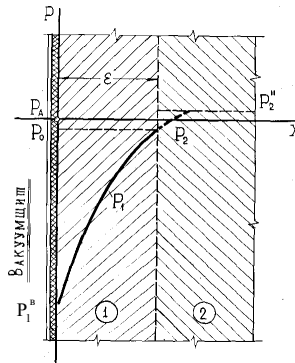


Рис. 1. Распределение разрежения (давления) в виброуложенной бетонной смеси при ее вакуумировании:

$P_a$  – атмосферное давление;  $P_0$  – давление на границе вакуумирования;

$P_1^a$  – давление в вакуумполости вакуумцинта;

$P_2^H$  – давление в свежееотформованном вибрационным способом бетонном образце (при  $t = 0$ );  $P_1$  – давление в вакуумируемой бетонной смеси;  $\epsilon$  – глубина распространения границы вакуумирования

Далее, задача о скорости распространения вакуума (границы вакуумирования) и о распределении давления по толщине уплотняемой вакуумированием бетонной смеси сведена к решению уравнений:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 P_1}{\partial X^2} \quad \text{для } 0 < X < \epsilon; \quad (2a)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 P_2}{\partial X^2} \quad \text{для} \quad \varepsilon < X < \infty. \quad (2б)$$

Решения имеют вид:

$$P_1 = A_1 + B_1 \psi \left( \frac{X}{2\sqrt{a_1 t}} \right); \quad (6)$$

$$P_2 = A_2 + B_2 \psi \left( \frac{X}{2\sqrt{a_2 t}} \right). \quad (7)$$

Начальные условия:

$$P_2 = P_2^H = \text{const} \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (8)$$

Граничные условия:

$$P_1 = P_1^H \quad \text{при} \quad X = 0 \quad \text{и} \quad t \geq 0; \quad (9)$$

$$P_2 = P_2^H \quad \text{при} \quad X = \infty \quad \text{и} \quad t \geq 0; \quad (10)$$

$$P_1 = P_2 = P_0 = \text{const} \quad \text{при} \quad X = \varepsilon \quad \text{и} \quad t > 0, \quad (11)$$

Удовлетворяя граничным условиям (9) и (10), из уравнения (6) получим:

$$\text{для} \quad X = 0 \quad A_1 = P_1^H;$$

$$\text{для} \quad X = \infty \quad A_2 + B_2 = P_2^H \quad \text{или} \quad A_2 = P_2^H - B_2.$$

С учетом этого частные решения примут вид:

$$P_1 = P_1^H + B_1 \psi \left( \frac{X}{2\sqrt{a_1 t}} \right); \quad (12)$$

$$P_2 = P_2^H - B_2 \left[ 1 - \psi \left( \frac{X}{2\sqrt{a_2 t}} \right) \right]. \quad (13)$$

Выполняя требование (11) при  $P_1 = P_2$ , получено:

$$P_1^H + B_1 \psi \left( \frac{\varepsilon}{2\sqrt{a_1 t}} \right) = P_2^H + B_2 \left[ 1 - \psi \left( \frac{\varepsilon}{2\sqrt{a_2 t}} \right) \right]. \quad (14)$$

Последнее условие должно иметь место при любых произвольно выбранных значениях  $t$ . Но поскольку  $V_1$  и  $V_2$  – константы, необходимо, чтобы гауссовы интегралы ошибок были постоянными величинами. Это возможно только в том случае, если при изменении  $\varepsilon$  с течением времени  $t$  аргументы функции  $\psi$  сохраняют постоянное значение. Таким образом, величина  $\varepsilon$  должна изменяться пропорционально  $\sqrt{t}$ . Если множитель пропорциональности обозначить через  $\alpha$ , то будем иметь:

$$\varepsilon = \alpha\sqrt{t}. \quad (15)$$

Дифференцируя (15) по  $t$ , получим скорость распространения вакуума по толщине формуемого изделия в виде:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\alpha}{2\sqrt{t}}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) видно, что вначале скорость распространения вакуума велика (в первый момент бесконечно велика), а затем быстро уменьшается.

Приведенные результаты исследований положены в основу наших разработок.

**Основной материал.** Если на границе  $X = 0$  (в вакуумполости вакуумщита) поддерживается постоянное давление  $P$ , а начальное давление равно нулю, то

$$P_x = P_a \left( 1 - \Phi \frac{X}{2\sqrt{at}} \right) = P_a \Phi \left( \frac{X}{2\sqrt{at}} \right). \quad (17)$$

Если положить, что

$$\xi = \frac{\varepsilon - X}{2\sqrt{at}},$$

то получим

$$\varepsilon = X + 2\xi\sqrt{at},$$

и далее

$$P_x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(X + 2\xi\sqrt{at}) e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi, \quad (18)$$

при  $t = 0$  получим

$$P_x = \Phi(X) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\xi^2} d\xi = \Phi(X). \quad (19)$$

Исходя из приведенных результатов исследований, в случае традиционного способа вакуумирования при помощи вакуумщита, когда давление  $P$  удовлетворяет уравнению (2) и условиям:

$$P = 0 \text{ при } t = 0,$$

$$P = 1 \text{ при } X = 0,$$

решение (12) с учетом (6) и (19) примет вид:

$$P = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{X}{2\sqrt{at}}} e^{-\xi^2} d\xi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{X}{2\sqrt{at}}}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi. \quad (20)$$

Если же давление (разрежение) в вакуумполости вакуумщита является функцией времени:

$$P = 0 \text{ при } t = 0,$$

и

$$P = \varphi(t) \text{ при } X = 0,$$

то используя теорему Дюамеля [3], получим решение в следующем виде:

$$P = \int_0^t \varphi(t_n) \frac{\partial}{\partial t} F(X, t - t_n) dt_n, \quad (21)$$

где

$$F(X, t - t_n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{X}{2\sqrt{a(t-t_n)}}}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\infty}^{\frac{X}{2\sqrt{a(t-t_n)}}} e^{-\xi^2} d\xi,$$

$t - t_n$  – время исследования процесса.

В этом случае:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} F(X, t - t_n) &= -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-t_n)}}\right)^2} \cdot \frac{X}{2\sqrt{a(t-t_n)}} = \\
 &= -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-t_n)}}\right)^2} \cdot \frac{-X \cdot a}{4\sqrt{a(t-t_n)}} = \\
 &= -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-t_n)}}\right)^2} \cdot \frac{-X}{4\sqrt{a(t-t_n)}^3} = \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{X}{4\sqrt{a(t-t_n)}^3} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-t_n)}}\right)^2} = \frac{X}{2\sqrt{\pi a(t-t_n)}^3} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_n)}} = \\
 &= \frac{X}{2\sqrt{\pi a(t-t_n)}^3} \cdot \exp\left[\frac{-X^2}{4a(t-t_n)}\right] \tag{22}
 \end{aligned}$$

Следовательно, решение нашей задачи можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P &= \int_0^t \varphi(t_n) \cdot \frac{X}{2\sqrt{\pi a(t-t_n)}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_n)}} = \\
 &= \frac{X}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^t \varphi(t_n) \cdot \frac{e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_n)}}}{\sqrt{(t-t_n)}^3} dt_n;
 \end{aligned}$$

Далее делаем замену:

$$\frac{X}{2\sqrt{a(t-t_n)}} = \gamma,$$

$$t - t_n = \frac{X^2}{4a\gamma^2},$$

$$\frac{X^2}{4a(t - t_n)} = \gamma^2,$$

$$t_n = t - \frac{X^2}{4a\gamma^2}.$$

Для  $dt_n$  получим:

$$dt_n = 0 - \frac{-X^2 \cdot 8a\gamma}{16a^2\gamma^4} d\gamma = \frac{X^2\gamma}{2a\gamma^4} d\gamma = \frac{X^2}{2a\gamma^3} d\gamma.$$

Если:  $t_n = 0$ , то  $\gamma = \frac{X}{2\sqrt{at}}$ ,

$t_n = t$ , то  $\gamma = \infty$ .

Таким образом:

$$\begin{aligned} P &= \frac{X}{2\sqrt{\pi a}} \int_{\frac{X}{2\sqrt{at}}}^{\infty} \varphi\left(t - \frac{X^2}{4a\gamma^2}\right) \cdot \frac{e^{-\gamma^2}}{\frac{X^3}{8a\sqrt{a\gamma^3}}} \cdot \frac{X^2}{2a\gamma^3} d\gamma = \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{X}{2\sqrt{at}}}^{\infty} \varphi\left(t - \frac{X^2}{4a\gamma^2}\right) \cdot e^{-\gamma^2} d\gamma \end{aligned} \quad (23)$$

Зависимость (23) удовлетворяет дифференциальному уравнению (2), а также принятым начальным и граничным условиям.

Если разрежение (давление) в вакуумполости вакуумцита  $P = P_1 = \text{const}$  при  $0 < t < T$  и  $P = P_2 = \text{const}$  при  $t > T$ , то получим:

$$P = P_1 \varphi\left(\frac{X}{2\sqrt{at}}\right) \text{ при } 0 < t < T \quad (24)$$

$$P = P_1 \varphi\left(\frac{X}{2\sqrt{at}}\right) + (P_2 - P_1) \varphi\left(\frac{X}{2\sqrt{a(t-T)}}\right) \text{ при } t > T \quad (25)$$



Если  $P = f(kt)$ , где  $k = \text{const}$ , то для  $P$  будет выражение:

$$P = kt \left[ \left( 1 + \frac{X^2}{2at} \right) \varphi \left( \frac{X}{2\sqrt{at}} \right) - \frac{X}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{X^2}{4at}} \right] \quad (26)$$

Если  $P = f(k\sqrt{t})$ , где  $k = \text{const}$ , то получим:

$$P = k\sqrt{t} \left[ e^{-\frac{X^2}{4at}} - \frac{X\sqrt{\pi}}{2\sqrt{at}} \varphi \left( \frac{X}{2\sqrt{at}} \right) \right] \quad (27)$$

Если давление (разрежение) в вакуумполости вакуумщита (при  $X = 0$ ) является гармонической функцией и задается выражением

$$P = A \cos(\omega t - \varepsilon), \quad (28)$$

где  $A$  – амплитуда изменения давления (разрежения) в вакуумполости вакуумщита;

$\omega$  – частота изменения давления (разрежения);

а начальное давление (разрежение) равно нулю, то из (23) следует, что наше решение будет иметь вид:

$$P = \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{X}{2\sqrt{at}}} \cos \left\{ \omega \left( t - \frac{X^2}{4a\gamma^2} \right) - \varepsilon \right\} e^{-\gamma^2} d\gamma. \quad (29)$$

Далее известно [2, 3], что

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{X}{2\sqrt{at}}} \cos \left\{ \omega \left( t - \frac{X^2}{4a\gamma^2} \right) - \varepsilon \right\} e^{-\gamma^2} d\gamma = \exp \left[ -X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \cos \left\{ \omega t - X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varepsilon \right\}. \quad (30)$$

Поэтому (29) можно записать в следующем виде:

$$P = A \exp \left[ -X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \cos \left\{ \omega t - X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varepsilon \right\} - \frac{2A}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} \cos \left\{ \omega \left( t - \frac{X^2}{4a\gamma^2} \right) - \varepsilon \right\} e^{-\gamma^2} d\gamma \quad (31)$$

Второй член в правой части соотношения (31) соответствует нестационарному возмущению, обусловленному началом колебаний давления (разрежения) в вакуумпости вакуумшита при  $t=0$ : при достаточно большом промежутке времени вакуумирования  $t$ , этот член становится равным нулю. В этом случае первый член уравнения (31) соответствует установившимся колебаниям с периодом  $\frac{2\pi}{\omega}$ .

$$P = A \exp \left[ -X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \cos \left\{ \omega t - X \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \varepsilon \right\} \quad (32)$$

Экспериментальные исследования проводились с использованием золобетонных смесей (портландцемента М 400, зола Приднепровской ТЭС).

Средняя дисперсность направляемых в отвалы зол находится в пределах 2600...6000 см<sup>2</sup>/г. Испытаниями установлено, что водопотребность золы на 25...30% больше водопотребности широко применяемых цементов. Что характерно, с увеличением удельной поверхности золы, ее водопотребность не увеличивается. Это еще раз подтверждает очень высокую пористость золы [7, 8].

Исходя из этого при производстве изделий целесообразно уплотнять золобетонные смеси вибровakuумированием, позволяющим эффективно управлять водопотребностью за счет удаления необходимой части воды затворения. Это предоставит возможность получать надлежащее уплотнение золобетона и увеличить прочность в несколько раз.

В исследованиях использовали золобетонные смеси состава 1 : 4 (Ц : З). Подвижность исходной бетонной смеси характеризовалась осадкой стандартного конуса – ОК = 3...4 см. При исследовании закономерностей распределения давления (разрежения) в уплотняемой бетонной смеси формовали образцы 15x15x15 см, а для определения плотности и прочности бетонов в возрасте 28 суток при принятых режимах уплотнения формовали образцы 15x15x7 см (при определении прочности их испытывали "на ребро"). Все отформованные образцы твердели в нормальных условиях.

Среднюю скорость распространения границы вакуумирования в уплотняемой бетонной смеси измеряли водяными манометрами, которые подключены к бетонной смеси посредством резиновых шлангов (диаметром 3 мм), заполненных водой через патрубки (4 шт.), расположенные по

диагонали боковой стенки формы [1, 6]. Патрубки внутри формы заканчиваются сетчатыми цилиндрами (диаметром 15 мм, длиной 25 мм) и обтянуты фильтровальной тканью.

Скорость распространения вакуума определяли по времени распространения границы вакуумирования на заданную толщину образца. Время измеряли от момента подключения к вакуумсистеме вакуумщита до момента начала движения воды от соответствующего манометра (расположенного на определенном уровне) к вакуумщиту (к водяному манометру).

Измерение величины разрежения по высоте (толщине) уплотняемой бетонной смеси производили при помощи системных ртутных вакуумметров, смонтированных на панели и подключенных к бетонной смеси аналогично водяным манометрам.

Результаты исследования закономерностей распределения давления (разрежения) в уплотняемой бетонной смеси приведены на рис. 2. Полученный общий характер кривых соответствует выведенным нами закономерностям.

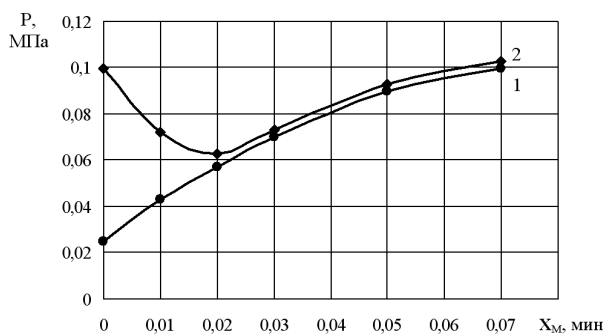


Рис. 2. Распределение давления (разрежения) в уплотняемой золобетонной смеси: 1 – при гармонических колебаниях; 2 – при изменении давления (разрежения)  $P=f(kt)$

С учетом теоретических разработок и полученных выводов была поставлена вторая серия опытов при трех различных режимах вакуумирования:

- при постоянном разрежении 0,7...0,75;
- при периодически изменяющемся (вакуумирование – 0,75, вибровacuумирование – 0,2...0,3) (гармонические колебания разрежения);
- постепенное увеличение разрежения до 0,75.

Чтобы определить для каждого режима требуемую продолжительность вакуумирования, она принималась различной, достигавшей в отдельных случаях 16...18 мин и более. Периодическое вибрирование при

виброввакуумировании проводилось по 5...20 с. с перерывами в зависимости от режима (величины разрежения) 60...180 с [1].

Для сравнения были отформованы вибрационным способом эталонные образцы. По полученным результатам построен рис. 3.

Обычно применяемый режим (вакуумирование при постоянном разрежении 0,75) оказался самым малоэффективным. Вместе с тем, эксперимент подтвердил эффективность режима с гармоническим изменением давления (разрежения), предлагаемого оптимального управления по быстрдействию – вакуумирование при максимально возможном разрежении, а периодическое вибрирование при небольшом разрежении 0,2...0,3. Здесь за наименьшее время получено наибольшее уплотнение бетонной смеси, и прочность вакуумбетона увеличилась в 2 раза и в 1,3 раза в сравнении с обычным широко распространенным режимом.

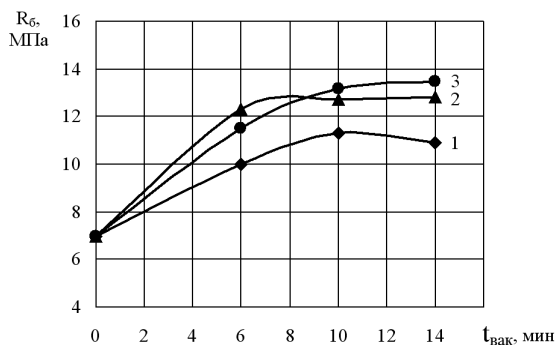


Рис. 3. Прочность вакуумзолотбетон в зависимости от режима и продолжительности виброввакуумирования:

- 1 – традиционный режим (постоянная величина разрежения);
- 2 – режим с гармоническими колебаниями разрежения;
- 3 – режим уплотнения при изменении разрежения  $P=f(kt)$

Применение режима с постепенно увеличивающейся величиной разрежения – с изменением реологических характеристик золотбетонной смеси изменялась величина давления вакуумшита – привело также к существенному увеличению прочности вакуумбетона в сравнении с виброуплотненным, но продолжительность виброввакуумирования значительно увеличивается.

Приведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить основные технологические параметры оптимального управления по быстрдействию при уплотнении золотбетонных смесей и показали, что применение такого управления позволяет значительно повысить эффективность уплотнения такой бетонной смеси и увеличить при этом существенно прочность вакуумбетона (по отношению к обычному режиму виброввакуумирования при постоянном разрежении – 0,65...0,75).

Исходя из общего положения о необходимости последовательного воздействия на бетонную смесь при уплотнении ее вибровакуумированием и основываясь на результатах наших исследований, предоставляется возможным определить направление дальнейшего совершенствования управления режимом уплотнения.

Основными параметрами такого управления могут быть:

– периодическое вибрирование при возрастающем ступенями разрежении от 0,1 до 0,3 (величина вакуумпригруза от 0,01 до 0,03 МПа) и увеличивающейся продолжительности последующих периодов вибрации от 5 до 15...20 с;

– вакуумирование (без вибрирования) также при периодически возрастающем разрежении от 0,3 до 0,65...0,9 – с увеличением продолжительности каждой последующей ступени вакуумирования.

Такое воздействие в большой мере соответствует изменяющимся условиям уплотнения бетонной смеси, вследствие изменения ее реологических характеристик в процессе вакуумирования.

**Выводы.** Получено уравнение вакуумной обработки золобетонной смеси в частных производных с учетом физической сущности процессов, происходящих при этом способе уплотнения. Решением этого уравнения при соответствующих начальных и граничных условиях даны зависимости для определения поля давления, времени распространения вакуума по толщине уплотняемого образца (изделия), скорости распространения границы вакуумирования. Полученные результаты имеют принципиальное значение для оптимального управления процессом вибровакуумирования (по быстродействию). Экспериментальные исследования подтвердили выводы, полученные при теоретических разработках – прочность вакуумзолобетона при рациональном режиме вибровакуумирования увеличивается в 2 раза и более.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожук, Н. А. Вибровакуумирование бетонных смесей и свойства вакуумбетона [Текст]: монография / Н. А. Сторожук. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 251 с.
2. Франк, Ф. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики [Текст] / Ф. Франк, Р. Мизес. – М.-Л.: Глав. Редакция общетехн. л-ры, 1937. – 998 с.
3. Гребер, Г. Основы учения о теплообмене [Текст] / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль. – М.: Издат. иностран. л-ры, 1958. – 556 с.
4. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики [Текст] / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, Н. Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
5. Карслоу, Х. С. Теория теплопроводности [Текст] / Х. С. Карслоу. – М. – Л.: Гостехиздат, 1947. – 288 с.
6. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит. – М.: Госстройиздат, 1959. – 294 с.