

УДК 691.3:51-74

**В.Н. Соков, А.М. Купфер,
В.В. Соков, Г.В. Мишина**

**ВЛАГОПЕРЕНОС
ПРИ САМОУПЛОТНЕНИИ
МАСС В ПЕРФОРИРОВАННОМ
ОБЪЕМЕ**

Рассмотрены теоретические аспекты формирования структуры материала в процессе активного влагопереноса в нем, заключенном в замкнутый перфорированный объем.

Ключевые слова: самоуплотнение, перфорированные формы, влагоперенос, моделирование.

UDK 691.3:51-74

**V.N. Sokov, A.M. Kupfer,
V.V. Sokov, G.V. Mishina**

**MOISTURE TRANSFER
IN SELF-PACKING MASS
IN PERFORATED
VOLUME**

Theoretical aspects of the material structure formation in the process of the active moisture transfer in it, enclosed in closed perforated volume, are considered.

Key words: self-packing, perforated forms, moisture transfer, modeling.

Для успешного протекания процесса самоуплотнения перфорация в стенке формы должна удовлетворять следующим требованиям: жидкая фаза удаляется через перфорированную стенку; твердая фаза удерживается в форме [1].

Легко видеть, что эти требования в общем случае противоречат друг другу. Ниже будет показано, что примирить их можно за счет рационального выбора формы и размеров отверстий. Заметим, что вероятность выноса твердой фазы наиболее реальна на ранних стадиях процесса, когда смесь обладает достаточной подвижностью [2].

Рассмотрим поведение смеси вблизи отверстия произвольной формы. Сила, нормальная к плоскости отверстия и стремящаяся вытолкнуть смесь из формы, может быть вычислена по формуле

$$F = s\Delta p, \tag{1}$$

где s — площадь отверстий; Δp — перепад давления на перфорированной стенке.

Сила, препятствующая вытеканию смеси через отверстие, равна

$$F' = 2\tau'q, \tag{2}$$

где τ' — предельное сопротивление сдвигу на единицу длины границы отверстия; q — полупериметр отверстия.

Будем считать, что при перепаде давления Δp происходит фильтрация жидкой фазы относительно твердой.

Условие удержания твердой фазы можно выразить в виде

$$F < F' \tag{3}$$

или

$$\Delta ps < 2\tau'q. \tag{4}$$

Обозначив

$$r_n = \frac{s}{q}, \tag{5}$$

можем записать условие удержания твердой фазы в виде

$$r < r_{кр} = \frac{2\tau'}{\Delta p}, \tag{6}$$

где через $r_{кр}$ обозначено критическое значение r , при котором может начаться вынос твердой фазы через перфорацию.

Заметим, что введенная величина $r_{\text{п}}$ совпадает (с точностью до множителя) с хорошо известным понятием гидравлического радиуса. Следуя общепринятым терминологическим традициям, назовем эту величину приведенным радиусом отверстия. Введенное понятие имеет то преимущество, что для круглого отверстия приведенный радиус совпадает с геометрическим.

При заданных τ' и Δp поведение твердой фазы определяется величиной $r_{\text{п}}$, которая зависит от размеров и формы отверстия.

Уменьшение $r_{\text{п}}$ позволяет проводить процесс при большем давлении, создавая дополнительные возможности управления технологией.

В качестве примера рассмотрим случаи круглого отверстия и прямоугольной щели. Для круглого отверстия радиуса r

$$r_{\text{п}} = r. \quad (7)$$

Для прямоугольной щели той же площади с отношением сторон $\lambda = a_2/a_1$,

$$\lambda = a_2/a_1, \quad (8)$$

их размеры будут

$$a_1 = r\sqrt{\pi/\lambda}, \quad (9)$$

$$a_2 = r\sqrt{\pi\lambda}. \quad (10)$$

Находим приведенный радиус щели

$$r_2 = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} = \frac{r^2 \pi}{r\sqrt{\pi}(\lambda + 1)} = r \frac{\sqrt{\pi\lambda}}{\lambda + 1}. \quad (11)$$

Из последней формулы видно, что приведенный радиус прямоугольного отверстия зависит от отношения сторон. Исследование функции $r_2(\lambda)$ показывает, что ее максимум достигается при $\lambda=1$; при изменении λ от 1 до 0 и от 1 до ∞ приведенный радиус стремится к 0. Пределы изменения λ варьируются от 0 (бесконечно длинная щель) до 1 (щель квадратного сечения).

Было проведено две серии экспериментов. В первой изучалось влияние радиуса круглого отверстия на предельное давление в форме. В установке использовались отверстия диаметрами 0,8, 1,0 и 2,0 мм. Указанный набор отверстий испытывали на смесях с относительной влажностью 0,4 и 0,5. Результаты, полученные в этой серии экспериментов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние диаметров отверстий и относительной влажности на величину предельного давления в форме

$W, \%$	$D, \text{мм}$	$r_{\text{п}}, \text{мм}$	$\Delta p, \text{кПа}$
0,4	0,8	0,4	15
0,4	1,0	0,5	12
0,4	2,0	1,0	6,0
0,5	0,8	0,4	6,0
0,5	1,0	0,5	4,8
0,5	2,0	1,0	2,4

Полученные результаты позволяют сделать вывод о линейной зависимости предельного давления от обратного гидравлического радиуса, что свидетельствует в пользу принятой гипотезы о постоянстве предельного сопротивления сдвигу на единицу длины границы отверстия. Максимальное отклонение экспериментальных данных от регрессионной прямой не превышало 15 %.

Во второй серии использовались отверстия одной и той же площади, имеющие форму прямоугольных щелей с различным отношением сторон.

Таким образом, изучалось влияние формы отверстий на величину предельно допустимого давления в форме.

Испытывались смеси с относительной влажностью 0,4 и 0,5. В табл. 2 приведены результаты второй серии экспериментов.

Таблица 2
Предельно допустимые перепады давления для прямоугольных щелей площадью 19,6 мм²

W, %	λ	r, мм	k_s	Δp , кПа
0,4	1	2,21	1,27	2,7
0,4	0,2	1,65	2,3	3,6
0,4	0,1	1,3	3,8	4,7
0,5	1	2,21	1,27	1,1
0,5	0,2	1,65	2,3	1,5
0,5	0,1	1,3	3,8	1,9

Как и в первой серии, полученные здесь результаты, подтверждают гипотезу о постоянстве предельного сопротивления сдвигу на единицу длины границы отверстий.

Из экспериментов следует, что это сопротивление при прочих равных условиях определяется относительной влажностью и может быть вычислено по формуле

$$\tau' = r\Delta p. \quad (12)$$

Из результатов вычислений по этой формуле, где величины r и τ' взяты из описанных экспериментов, следует, что перфорация в форме прямоугольных щелей имеет преимущество перед перфорацией в виде отверстий круглой формы, поскольку позволяет проводить процесс при большем перепаде давления, причем это преимущество возрастает при увеличении отношения размеров щели. Этот вывод был реализован при изготовлении форм для технологической линии на ОАО «Подольскогнеупор».

Результаты исследования позволяют по заданным значениям перепада давления в форме и относительной влажности рассчитывать параметры отверстий, образующих перфорацию.

Порядок расчета может быть следующим:

1) по заданной относительной влажности находим предельное сопротивление сдвигу;

2) для заданного перепада давления определяем приведенный радиус r по формуле

$$r_n = \frac{2\tau'}{\Delta p}; \quad (13)$$

3) задавшись определенной формой отверстий, находим их размеры. Для кругового отверстия радиус определяется по формуле

$$r = r_n. \quad (14)$$

В случае прямоугольной щели необходимо определить 2 параметра, например, длину и ширину или один из линейных размеров и отношение сторон. Один из параметров нужно задать заранее. Зададим ширину щели a_1 и найдем ее длину a_2

$$a_2 = \frac{2a_1}{\lambda a_1 - a_2}. \quad (15)$$

Из конструктивных соображений может оказаться более удобным задавать длину щели, а ширину определять по формуле

$$a_1 = \frac{2a_2}{\lambda a_2 - a_1}, \quad (16)$$

которая получается из (15) заменой (взаимной) a_1 и a_2 .

В качестве примера рассчитаем максимальную ширину щели для перепада давления 6 кПа при длине щели 20 мм и относительной влажности 0,4. Из табл. 1 определяем $\tau' = 3$ (предельное сопротивление сдвигу на единицу длины границы отверстия). Затем по формуле (13) рассчитываем приведенный радиус $r_{п} = 1$ мм. Далее по формуле (15) определяем максимальную ширину щели $a_2 = 1$ мм. Если требуется круглое отверстие, то его радиус, естественно, будет равен $r_{п}$, т.е. 1 мм.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать некоторые выводы:

при удалении влаги через перфорированные стенки при самоуплотнении масс необходимо обеспечить максимально возможную величину предельного перепада давления, при котором еще не происходит выноса твердой фазы из формы;

величина предельного давления зависит от формы отверстий и влажности формовочных масс;

размеры и форма отверстий применительно к явлению влагопереноса через перфорированные стенки характеризуется приведенным радиусом, $r_{п}$;

уменьшение приведенного радиуса позволяет увеличить перепад давления в смеси, что облегчает процесс влагоудаления и повышает производительность установки;

при заданной площади наибольшим приведенным радиусом обладает круглое отверстие, поэтому целесообразным является отступление от круглой формы;

при изготовлении стенок формы с круглой перфорацией возникает необходимость в трудоемкой операции — сверлении большого количества отверстий;

более выгодной с точки зрения удержания твердой фазы и более технологичной в изготовлении является перфорация в виде прямоугольных щелей;

для щелевой перфорации снижается трудоемкость очистки;

расчет параметров щелей может быть выполнен по предложенной методике.

Исследование совместного влияния параметров жидкой и твердой фаз на процесс влагоудаления при самоуплотнении масс в замкнутом перфорированном объеме. Обычно формовочная смесь рассматривается с макроскопической точки зрения. Учет свойств жидкой фазы и размеров частиц твердой позволяет исключить из расчетных формул макроскопический параметр — перепад давления.

Рассмотрим движение жидкой фазы между твердыми частицами вблизи отверстия. При наиболее плотной упаковке частиц сила капиллярного давления, препятствующая вытеканию жидкой фазы, может быть вычислена по формуле

$$F'_{ж} = \alpha_{ж} \pi r \cos \theta_{ж}, \quad (17)$$

где $\alpha_{ж}$ — коэффициент удержания жидкой фазы; r — радиус частицы твердой фазы; $\theta_{ж}$ — угол смачивания жидкой фазы относительно твердой.

Сила, благодаря которой происходит выведение из формы жидкой фазы, равна

$$F_{ж} = \Delta p r^2 \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (18)$$

где Δp — перепад давления в жидкой фазе.

Для успешного выведения жидкой фазы должно быть

$$F_{ж} > F'_{ж}. \quad (19)$$

Отсюда получаем условие, которому должен удовлетворять перепад давления жидкой фазы вблизи стенки формы:

$$\Delta p_w \geq \frac{\alpha \cos \theta_{\text{ж}}}{r(\sqrt{3} - \pi/2)}. \quad (20)$$

Рассмотрим теперь силы, действующие на смесь в целом. Из формулы (3) можно получить условие для перепада давления

$$\Delta p < \frac{2\tau'}{r}. \quad (21)$$

Для дальнейшего рассмотрения понадобятся соотношения, связывающие полное давление смеси с давлением жидкой и твердой фаз. В механике грунтов давление в жидкой фазе называют нейтральным, а в твердой — эффективным. Согласно [1], для любого момента времени в полностью насыщенной пористой среде имеет место соотношение

$$p = p_c + p_w, \quad (22)$$

где p , p_c , p_w — соответственно полное, эффективное и нейтральное давление.

Из механики грунтов известно, что перераспределение полного давления между эффективным и нейтральным происходит за счет изменения пористости, которое в свою очередь вызывается изменением влагосодержания. Таким образом, можно записать

$$p_c = k_1 p, \quad (23)$$

$$p_w = k_2 p. \quad (24)$$

Величины k_1 и k_2 можно назвать коэффициентами передачи соответственно эффективного и нейтрального давлений. В силу сказанного выше эти величины должны зависеть от водонасыщенности s . Из (8) следует, что

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (25)$$

Вид функций для k_1 и k_2 можно получить из физических соображений. Для этого заметим, что при влагосодержании, превосходящем некоторое значение s_{n+1} , давление передается лишь на жидкую фазу и, следовательно, $k_1 = 1$, $k_2 = 0$. При уменьшении влагосодержания, начиная с некоторого s_1 , напротив, передача давления идет через твердую фазу, тогда соответственно будет $k_1 = 0$, $k_2 = 1$.

Для промежуточных значений s искомую зависимость можно построить, например, в виде полинома Лагранжа, используя измеренные значения $k_i(s_j)$; $i = 1, 2$; $j = 2, \dots, n$:

$$k_1(s) = \theta(s_{n+1} - s) \sum_{i=1}^{n+1} \prod_{j=1}^{n+1} \frac{(s_i - s)}{(s_i - s_j)} k_1(s_{\perp}), \quad (26)$$

где \prod означает всевозможные произведения указанного вида, для которых $i \neq j$; $i, j = 1, \dots, n+1$; $\theta(s_{n+1} - s)$ — единичная функция Хевисайда, определяемая следующим образом:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \leq 0 \\ 0 & \text{при } x > 0 \end{cases}.$$

Величина k_2 находится по формуле (25).

При отсутствии экспериментальных данных имеем $n = 1$, формула (10) принимает вид линейной зависимости

$$k_1(s) = \theta(s - s_2) \frac{(s - s_2)}{(s_1 - s_2)}. \quad (27)$$

Такие линеаризованные зависимости достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, приведенных в [1].

Теперь условие (18) для жидкой фазы можно переписать в виде

$$k_2 \Delta p r^2 (\sqrt{3} - \pi/3) \geq \alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}} \pi r, \quad (28)$$

откуда

$$\Delta p \geq \frac{\alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}{k_2 r (\sqrt{3} - \pi/3)}. \quad (29)$$

Сравнивая условие удержания твердой фазы с условием вытекания жидкой, получаем соотношение

$$\frac{2\tau'}{k_1 r} > \frac{\alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}{k_2 r (\sqrt{3} - \pi/3)}, \quad (30)$$

которое не содержит Δp .

Отсюда получаем оценку для приведенного радиуса r

$$r < \frac{2\tau' k_2 r (\sqrt{3} - \pi/3)}{k_1 \alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}, \quad (31)$$

естественным образом совпадающую с оценкой для радиуса кругового отверстия. Учитывая, что $\sqrt{3} - \pi/3 \cong 0,32$, запишем ее в виде

$$r < 0,64k \frac{\tau' r}{\alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}, \quad (32)$$

где $k = k_2/k_1$.

Для прямоугольной щели длиной a_1 получим следующую оценку ширины:

$$a_1 \leq 2a_2 / \left(\frac{a_2 \alpha_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{ж}}}{0,64 r k_1 \tau'} - 2 \right). \quad (33)$$

Видно, что с уменьшением размеров зерен твердой фазы уменьшаются максимальные размеры отверстий, при которых еще обеспечивается ее удержание. Учитывая приближенный характер построенной модели можно все же отметить, что при соблюдении введенных соотношений процесс самоуплотнения становится менее критичным по отношению к перепаду давлений в форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишин В.М., Соков В.Н. Теоретические и технологические принципы создания теплоизоляционных материалов нового поколения в гидротеплосиловом поле. М. : Молодая гвардия, 2000.

2. Соков В.В. Безобжиговые теплоизоляционные шамотные изделия : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 1997.

REFERENCE

1. Mishin V.M., Sokov V.N. *Teoreticheskiye i tekhnologicheskiye printzipy sozdaniya teploizolyatsionnykh materialov novogo pokoleniya v gidroteplosilovom pole* [Theoretical and technological principles of lagging materials of new generation in hydro heat power field]. Moscow, 2000.

2. Sokov V.V. *Bezobzhigovyye teploizolyatsionnyye shamotnyye izdeliya : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Nonfired thermally insulating chamotte ware : author's abstract of the Candidate of Technical Science]. Moscow, 1997.

Поступила в редакцию в мае 2011 г.

Об авторах:

Соков Виктор Николаевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов, МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mgsu_toim@mail.ru;

Купфер Александр Маркович, ст. преподаватель кафедры прикладной математики, МГСУ,

About authors:

Sokov Viktor Nikolayevich, Professor, Doctor of Engineering Science, Professor of finishing and insulating materials technology department, MSUCE, 26 Yaroslavskoye Freeway, 129337, Moscow, Russia, mgsu_toim@mail.ru;

Kupfer Alexander Markovich, Senior Professor of applied mathematics department MSUCE, 26 Yaro-

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mgsu_toim@mail.ru;

Соков Вадим Викторович, кандидат технических наук, кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов, МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mgsu_toim@mail.ru;

Мишина Галина Владимировна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов, МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mgsu_toim@mail.ru

slavskoye Freeway, 129337, Moscow, Russia, mgsu_toim@mail.ru;

Sokov Vadim Viktorovich, Candidate of Technical Science, Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Freeway, 129337, Moscow, Russia, mgsu_toim@mail.ru

Mishina Galina Vladimirovna, Assistant Professor, Candidate of Technical Science, Assistant Professor of finishing and insulating materials technology department, Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Freeway, 129337, Moscow, Russia, mgsu_toim@mail.ru