

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСМОТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

**Н. И. Гамаюнов, С. Н. Гамаюнов**

Тверской государственной технической университет

Рассмотрен механизм развития осмотических давлений при сушке, термообработке пористых материалов и метод их исследования с помощью микроосмометров.

**Ключевые слова:** *массоперенос, осмотическое давление, микроосмометры, термообработка, структура материала, прочность*

Процессы сушки, термообработки пористых и дисперсных материалов, тепломассоперенос в почвах, растениях, клетках и каналах живых организмов сопровождаются обменом энергии, энтропии вещества, информации с окружающей средой. Это открытые системы. В них происходит осмотический перенос жидкости [1].

Для измерения осмотических давлений применяли микроосмометры. Это запаянные с одного конца стеклянные капилляры с внутренними радиусами от 0,1 до нескольких микрометров, наружными размерами 0,1–0,3 мм и длиной 5–10 см. Микроосмометры позволяют практически в "точке" измерять осмотические давления  $p_c$  до 1,5 МПа, которые рассчитывали по формуле:  $p_c = Pl(1/l_0 - 1/l_x)$ , где  $P$  – атмосферное давление;  $l$  – длина капилляра;  $l_0$ ,  $l_x$  – начальное и переменное значения длины пузырька воздуха у запаянного конца капилляра [2]. Если осмотическое давление в материале больше, чем в капиллярной трубке, то она обезвоживается. Более высокие осмотические давления можно измерить микроосмометрами с меньшими внутренними радиусами.

Измерения осмотических давлений с помощью микроосмометров проводили в колонке с песком фракции 0,2–0,3 мм. Колонку устанавливали горизонтально. С открытого торца колонки перпендикулярно ее поверхности внедряли микроосмометры. С противоположной стороны образец через пористую мембрану подпитывался водой. Влага из колонки испарялась при температуре парогазовой среды 295 К и относительной влажности воздуха  $\varphi = 0,55$ . В течение всего времени опыта при обезвоживании поверхностного слоя осмотическое давление возрастало (рис. 1), а на глубине 4 мм оно было незначительным. Под воздействием градиентов осмотического давления происходил перенос жидкости в направлении меньшего

влажностности и более высоких значений  $p_c$ .

Аналогичные изменения осмотических давлений наблюдали в процессе сушки торфа высокой степени дисперсности (рис. 2). Сушку цилиндрических образцов торфа с начальным диаметром 4 см и длиной 6 см проводили в камере при температуре 298 К и  $\phi=0,55$ . Тепло поступало от электрического нагревателя, создающего тепловой поток  $0,5 \text{ кВт/м}^2$ .

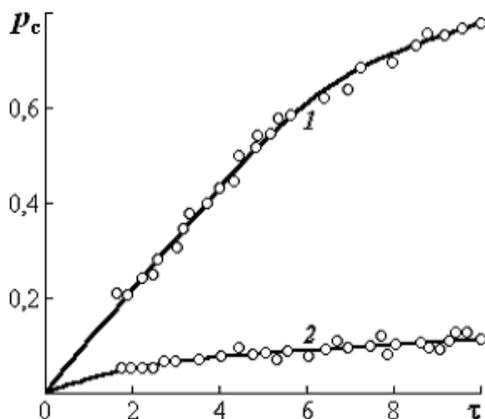


Рис. 1. Зависимость изменения во времени  $\tau$  (ч) в колонке песка фракции 0,2–0,3 мм осмотического давления  $p_c$  (кПа) на поверхности (1) и на расстоянии 4 мм внутри материала (2)

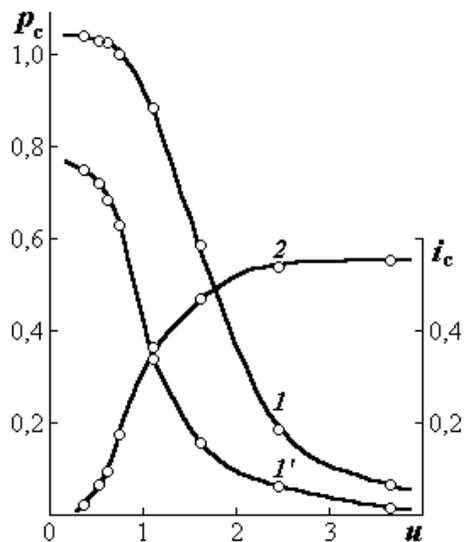


Рис. 2. Изменение осмотического давления  $p_c$  (МПа) на поверхности (1) и в центре (1') цилиндрического образца торфа, а также интенсивности сушки  $i_c$  (кг/(м<sup>2</sup>·ч)) (2) от влажностности  $u$  (кг воды/кг сухого вещества торфа)

По мере обезвоживания образца торфа давление  $p_c$  возрастает более интенсивно на его поверхности (кривая 1), чем в центре (1'). Возникает перепад давлений и соответственно поток жидкости и пара в парогазовую среду (кривая 2). Под воздействием осмотического давления происходит значительная усадка материала.

Рост осмотических давлений наблюдается в процессе твердения цемента и бетона. В образцах размером  $7 \times 7 \times 7$  см с водоцементным отношением 0,25 при температуре 293 К и  $\phi = 0,55$  возникает процессы массопереноса воды, испарение ее с верхней открытой грани куба и увеличение прочности [2]. Остальные грани кубического образца были теплоизолированы. Микроосмометры устанавливали в поверхностные слои открытой грани образцов после их формования.

Осмотические давления интенсивно развиваются в первые часы после затворения. Происходит растворение отдельных компонентов цемента и образование новых коагуляционных, а затем фазовых контактов между частицами [3]. Затем рост осмотических давлений снижается (рис. 3). Максимальная его величина в цементном камне достигает значения 0,55 МПа в течение трех суток (кривая 1), а в бетоне – 12 суток (кривая 2). Осмотическое давление  $p_c$  пропорционально отношению  $n_2/n_1$  – количества молей поглощенной (связанной)  $n_2$  и свободной (осмотической)  $n_1$  воды [1]. Молекулы воды  $n_2$  имеют меньшую подвижность при химической и физической сорбции и гидратации. Следует также учитывать осмотическое давление в растворе: вода–молекулы, ионы веществ, возникающих при растворении цемента.

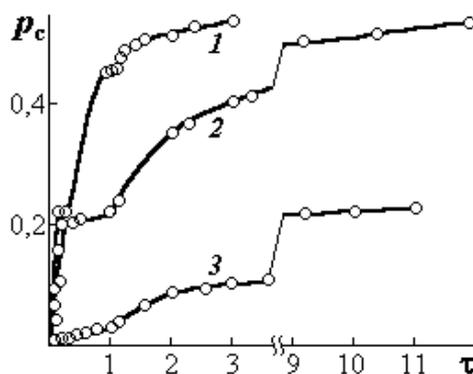


Рис. 3. Изменение осмотического давления  $p_c$  (МПа) в процессе твердения  $t$  (сут.) цементного камня (1), бетона (2), цемента в герметически закрытой оболочке (3)

Относительная доля «связанной» воды в цементе при равных значениях водоцементного отношения больше, чем в бетоне. В последнем имеется наполнитель. Поэтому осмотическое давление в

цементном камне (кривая 1) в первые сутки твердения более высокое, чем в бетоне (кривая 2).

В образце цемента, помещенного в герметически закрытую оболочку, испарение влаги не происходит. Осмотическое давление возрастает вследствие образования раствора и гидратации новообразований при растворении водорастворимых соединений цемента (увеличения  $n_2$ ). Возникает также сорбция молекул воды на вновь образуемой структуре цемента. Влагосодержание образца в оболочке больше, а осмотическое давление (кривая 3) меньше, чем в образце, в котором происходит испарение воды (кривая 1).

При испарении поверхностные слои увлажненного цемента и бетона обезвоживаются. В них по толщине обезвоживаемого слоя создаются неравномерные распределения влагосодержания и осмотического давления. Последние вызывают деформацию и усадку материала. Наиболее интенсивно усадка возникает вблизи открытой поверхности в период, когда образуются когезионные контакты между частицами новообразований и создается коагуляционная структура. При образовании фазовых контактов в поверхностных слоях цемента и бетона показания микроосмометров остаются постоянными, так как прекращаются процессы растворения, сорбции влаги и ее испарения из этих слоев.

В процессе термообработки изделий из бетона их поверхностные слои значительно обезвоживаются. Для исследования этого явления были приведены опыты по измерению давлений в поверхностных слоях микроосмометрами, которые внедрялись на различных расстояниях от открытой грани бетонного образца (рис. 4, 5).

Опыты проводили с бетонными смесями двух составов. В первой смеси (рис. 4 *a*) количество портландцемента, песка, щебня и воды соответственно было 510, 610, 1150, 185 кг/м<sup>3</sup>; во второй (*b*) – 230, 842, 1190, 138 кг/м<sup>3</sup>.

Осмотическое давление при температуре 325 К у нагреваемой поверхности образца быстро возрастало и достигало ~0,24 МПа, а в слоях на расстоянии 2–4 мм от открытой поверхности до 0,12 МПа. С увеличением  $h$  давление изменялось незначительно (рис. 4, *a*).

При более высокой температуре 358 К микроосмометры вблизи нагреваемой поверхности отмечали низкое осмотическое давление. Оно было вызвано парообразованием и давлением пузырьков воздуха в макропорах. По мере обезвоживания и повышения температуры поверхностных слоев материала микроосмометры показывали повышение осмотического давления.

О наличии зоны интенсивного парообразования свидетельствуют распределения осмотических давлений на разных расстояниях от

поверхности. Зона интенсивного обезвоживания преимущественно крупных пор и парообразования по мере прогрева материала возрастала от нуля до 4 мм (рис. 4, *a*). В слоях до 4 мм с увеличением их прогрева и обезвоживания наблюдали повышение осмотического давления, а при  $h > 10$  мм оно было незначительным и мало изменялось во времени.

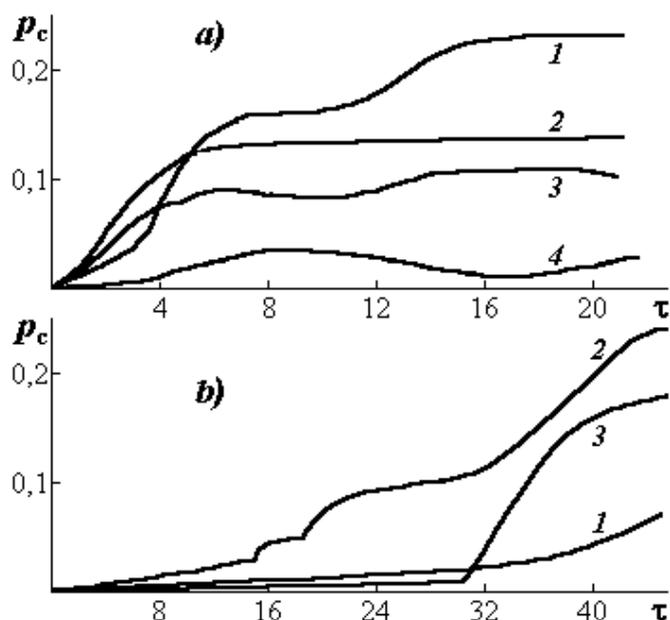


Рис. 4. Зависимость осмотического давления  $p_c$  (МПа) в цементном тесте первого (*a*) и второго (*b*) составов от времени  $\tau$  (ч) и температуры на расстоянии от открытой поверхности: *a* – 0,5 (1), 1,7 (2), 3,9 (3), 18,6 (4) мм,  $T=325$  К; *b* – 0,7 (1), 4,1 (2), 8,8 (3) мм,  $T=330$  К

В образце из второй бетонной смеси давление у греющей поверхности (рис. 4, *b*, кривая 1) оказалось меньше, чем в более глубоких слоях. Во втором образце пористость была большей, чем в первом. Наличие в этом образце крупных пор способствовало при температуре 330 К интенсивному переносу пара. Давление расширяющихся газовых пузырьков в макропорах компенсировало в течение продолжительного времени нагрева осмотическое давление в слоях бетона вблизи открытой поверхности. В более глубоких слоях в связи с уменьшением температуры по мере их обезвоживания наблюдался рост осмотических давлений, которые достигали более 0,2 МПа.

Следует также отметить большую продолжительность прогрева поверхностных слоев, при котором наблюдался рост осмотических давлений. Вызвано это тем, что водоцементное отношение второй смеси

0,6 существенно больше, чем первой – 0,36. Для испарения избытка влаги во второй смеси требовалось большее время, чем для первой.

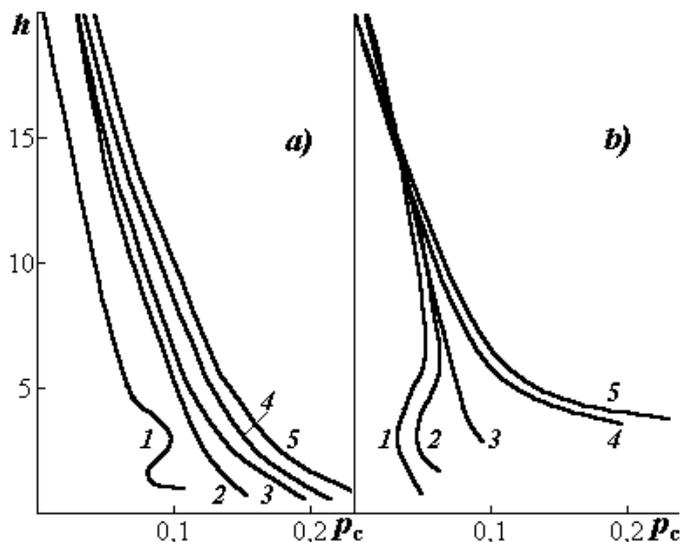


Рис. 5. Распределение осмотического давления  $p_c$  (МПа) в поверхностном слое бетона толщиной  $h$  (мм) при различном времени твердения:  $a$  – 2 (1), 4 (2), 8 (3), 10 (4), 12 (5) ч;  $b$  – 1 (1), 2 (2), 4 (3), 8 (4), 12 (5) ч при температурах 325 ( $a$ ) и 346 ( $b$ ) К

Повышение температуры существенно влияет на процессы структурообразования в цементном камне и бетоне. С увеличением температуры возрастает масса водорастворимых компонентов. Это влечет рост их концентрации в растворе, но снижает количество коагуляционных и затем фазовых контактов из-за более интенсивного перемещения частиц, что вызывает снижение прочности цемента и бетона.

Причиной уменьшения прочности, как это следует из проведенных экспериментов, является обезвоживание поверхностных слоев бетонных образцов. Это ухудшает процесс растворения цемента и соответственно уменьшает число фазовых контактов между частицами. С увеличением времени, в течение которого происходит образование фазовых контактов (рост прочности), осмотические давления в поверхностных слоях бетона возрастают (рис. 5).

Защемленные пузырьки воздуха стремятся раздвинуть частицы малопрочной в начальной стадии твердения коагуляционной структуры, а осмотическое давление, наоборот, – уплотнить их. Их распределение вблизи открытой поверхности неравнозначно (рис. 5). Возникает неравномерная усадка периферийных слоев, приводящая к образованию поверхностных трещин в местах, в которых число фазовых контактов между отдельными частицами наименьшее. Последующее увеличение

перепадов осмотических давлений и температуры вызывает дальнейшее развитие этих трещин, что приводит к снижению прочности бетонного изделия, прошедшего термообработку, по отношению к изделиям, получаемым в обычных «комнатных» температурах.

В заключение следует отметить, что применение микроосмометров позволяет получать информацию о процессах массопереноса, контролировать и управлять этими процессами путем изменения режимов термообработки и сушки различных материалов.

### **Список литературы**

1. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Новый подход к процессам массопереноса и «поверхностным явлениям» // Вестник ТвГУ. Сер. «Физика», 2009. № 3. Вып. 4. С. 112–117.
2. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Тепломассоперенос в открытых системах. Тверь: ТГТУ, 2009. 256 с.
3. Щукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1992. 414 с.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF OSMOTIC PRESSURES**

**N. I. Gamayunov, S. N. Gamayunov**

Tver State Technical University

A review is given of the mechanisms of osmotic pressure evolution during drying and thermal treatment of porous materials and their study with the aid of microosmometers.

**Keywords:** *mass transfer, osmotic pressure, microosmometers, thermal treatment, materials structure, strength* массоперенос, осмотическое давление, микроосмометры, термообработка, структура материала, прочность

*Об авторах:*

ГАМАЮНОВ Николай Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры общей физики факультета природопользования и инженерной экологии ТГТУ, 170026, г. Тверь, наб. Аф.Никитина, 22; *e-mail:* sng61@mail.ru;

ГАМАЮНОВ Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор факультета природопользования и инженерной экологии ТГТУ.