

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.12737/article\_59a93b0a115287.77901848

Аниканова Т.В., канд. техн. наук, доц.,  
Рахимбаев Ш.М., д-р техн. наук, проф.,  
Погромский А.С., ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ\*

anik.tv@yandex.ru

Для теплоизоляционных строительных материалов, особенно ячеистых, большую роль играют процессы переноса тепла в порах. Использование критериев подобия позволяет получить дополнительную информацию о процессах теплообмена, которые происходят в материале, что дает возможность прогнозировать и оптимизировать поровую структуру материала в процессе его производства и эксплуатации.

Критерий Грасгофа характеризует стадию формирования поровой структуры пенобетона и газобетона. При прочих равных условиях в период формирования структуры в пенобетоне имеются более благоприятные условия для роста пузырька, чем в газобетоне. Чем больше величина критерия Прандтля, тем хуже работает тепловой пограничный слой. Расчеты показали, что тепловой пограничный слой в газобетоне будет работать несколько хуже, чем в пенобетоне.

**Ключевые слова:** теория подобия, критерии подобия, коэффициент теплопроводности, тепловой пограничный слой.

**Введение.** Теория подобия широко применяется при расчете физических и физико-химических процессов. Критерии подобия являются мерами соотношения между параметрами, существенными для рассматриваемого процесса. Они обладают всеми свойствами инвариантов, так как безразмерны, могут изменять свое значение от точки к точке данной системы, но для сходственных точек подобных систем не зависят от относительных размеров природы и модели. В силу безразмерности численные значения критериев подобия не зависят от применяемой системы единиц измерения [1].

Критерии подобия могут быть получены для любого процесса, если известны аналитические зависимости между характеризующими его величинами. Обычно это дифференциальные уравнения, описывающие процесс. Вместе с тем следует отметить, что один и тот же процесс, которому соответствует определенное дифференциальное уравнение, может быть интегрально описан при использовании различных систем критериев.

**Основная часть.** Критерии Грасгофа и Рэлея описывают процессы переноса в поле силы тяжести.

Критерий Грасгофа рассчитывается по уравнению 1:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – определяющий геометрический размер, м;  $\beta$  – коэффициент объемного теплового расширения газа, °K<sup>-1</sup>;  $\Delta t$  – разность температур, °K;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с, который равен  $\frac{\mu}{\rho}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Критерий  $Gr$  представляет собой меру соотношения сил внутреннего трения (вязкости) и подъемной силы, определяемой разностью плотностей в различных точках неизотермического потока. Иными словами, он показывает отношение сил, вызывающих движение пузырька вверх, к силам внутреннего трения – вязкости, препятствующим этому.

Применительно к пенобетону и газобетону этот критерий характеризует стадию формирования поровой структуры. Числитель отражает силы, вызывающие рост диаметра пузырька, а знаменатель – силы внутреннего трения, препятствующие расширению. Расчет этого критерия позволяет сравнить формирование пузырька газа в пенобетоне и в газосиликате неавтоклавного твердения.

Справочные данные [2] для расчета критерия Грасгофа, а также критерия Рэлея и Прандтля приведены в табл.1.

При выполнении расчета учитывали, что в порах пенобетона находится кислород, а газобетона – водород. Результаты расчета критерия

Грасгофа для пенобетона и газобетона представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

## Справочные данные для расчета критериев

Показатель	Газ	
	водород	кислород
Коэффициент объемного теплового расширения газа, °K <sup>-1</sup>	3,664 · 10 <sup>-3</sup>	3,672 · 10 <sup>-3</sup>
Коэффициент динамической вязкости, Па · с	0,0088 · 10 <sup>-3</sup>	0,0202 · 10 <sup>-3</sup>
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	0,09	1,47
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °K)	0,2	0,034
Теплоемкость, Дж/(кг · °K)	14,27 · 10 <sup>3</sup>	1,009 · 10 <sup>3</sup>

Таблица 2

## Значения критерия Грасгофа для пенобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °K				
	1	2	3	4	5
0,5	0,023838	0,047676	0,071513	0,095351	0,119189
1	0,190702	0,381404	0,572106	0,762808	0,95351
2	1,525616	3,051232	4,576848	6,102464	7,628081
3	5,148954	10,29791	15,44686	20,59582	25,74477
4	12,20493	24,40986	36,61479	48,81972	61,02464
5	23,83775	47,6755	71,51326	95,35101	119,1888

Таблица 3

## Значения критерия Грасгофа для газобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °K				
	1	2	3	4	5
0,5	0,00047	0,00094	0,001409	0,001879	0,002349
1	0,003758	0,007517	0,011275	0,015033	0,018792
2	0,030067	0,060133	0,0902	0,120267	0,150334
3	0,101475	0,20295	0,304425	0,4059	0,507376
4	0,240534	0,481067	0,721601	0,962134	1,202668
5	0,469792	0,939584	1,409377	1,879169	2,348961

Сравнение критерия Грасгофа показывает, что в пенобетоне он в несколько раз больше, чем в газобетоне. Это связано с тем, что плотность и коэффициент динамической вязкости кислорода больше, чем у водорода, а при расчете критерия Грасгофа эти величины возводятся в квадрат.

Большое значение величины критерия Грасгофа свидетельствует о том, что пузырьку легче увеличиваться в объеме.

Таким образом, при прочих равных условия в период формирования пузырька в пенобетоне имеются более благоприятные условия для роста пузырька, чем в газобетоне.

Критерий Рэлея связан с процессами теплопереноса внутри газового пузырька в процессе эксплуатации поробетонов. Он рассчитывается по уравнению 2:

$$Ra = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu \cdot a} = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot c \cdot \rho}{\nu \cdot \lambda} \quad (2)$$

где  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с, равная  $\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ;  $c_p$  – теплоемкость, Дж/(кг · °C);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C);  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Критерий Рэлея показывает отношение величины теплового расширения к силам вязкости и к теплопроводности. Результаты расчета критерия Рэлея для пенобетона и газобетона представлены в табл. 4 и 5.

Для пенобетона критерий Рэлея значительно больше, чем для газобетона, что подтверждает

утверждение: рост пузырька газа в пенобетоне происходит легче, чем в газобетоне.

Таблица 4

## Значения критерия Рэлея для пенобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °К				
	1	2	3	4	5
0,5	0,01429	0,02858	0,04287	0,05716	0,071449
1	0,114319	0,228638	0,342957	0,457277	0,571596
2	0,914553	1,829106	2,743659	3,658212	4,572765
3	3,086616	6,173233	9,259849	12,34647	15,43308
4	7,316424	14,63285	21,94927	29,2657	36,58212
5	14,28989	28,57978	42,86967	57,15956	71,44945

Таблица 5

## Значения критерия Рэлея для газобетона

Диаметр пор, мм	Разность температур, °К				
	1	2	3	4	5
0,5	0,000295	0,00059	0,000885	0,00118	0,001475
1	0,00236	0,00472	0,007079	0,009439	0,011799
2	0,018878	0,037757	0,056635	0,075513	0,094391
3	0,063714	0,127428	0,191143	0,254857	0,318571
4	0,151026	0,302052	0,453079	0,604105	0,755131
5	0,294973	0,589946	0,884919	1,179893	1,474866

В предыдущих публикациях авторов [3–6] была выдвинута гипотеза о том, что в процессах переноса тепла поробетонов значительную роль играет тепловой пограничный слой (пристенный слой). В связи с этим авторы данной работы исходят из того, что теплоперенос в поробетонах происходит путем теплопроводности через твердую межпоровую перегородку, далее через тепловой пограничный слой достигает поры, где дальнейший процесс осуществляется с учетом газообразной фазы.

В порах достаточно малого диаметра, очевидно, все пространство занимает тепловой пограничный слой и в этом случае теплоперенос по всей поре происходит путем теплопроводности. Если диаметр поры превышает определенный размер, то в ней возможен и конвективный перенос, который отличается большей интенсивностью в сравнении с теплопроводностью.

Критерий Прандтля характеризует подобие физических свойств теплоносителей в процессах конвективного теплообмена. Он является мерой подобия полей температур и скоростей, показывает отношение сил вязкости к интенсивности теплопереноса. Критерий Прандтля рассчитывается по уравнению 3:

$$\frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = Pr, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/s$ , который равен  $\frac{\mu}{\rho}$ ;  $a$  – температуропроводность,  $m^2/s$ , равная  $\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ ;  $\mu$  – коэффициент дина-

мической вязкости,  $Pa \cdot s$ ;  $c_p$  – теплоемкость,  $Dж/(кг \cdot ^\circ C)$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot ^\circ C)$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $кг/м^3$ .

Критерий Прандтля показывает отношения вязкости к температуропроводности. Чем больше величина критерия  $Pr$ , тем хуже работает тепловой пограничный слой. Для пенобетона критерий  $Pr$  равен 0,5995, для газобетона – 0,6279, значит, тепловой пограничный слой в газобетоне будет работать несколько хуже.

Число Кнудсена характеризует роль переноса тепла с участием газовой фазы. Симплекс подобия (или число) Кнудсена определяется по уравнению 4:

$$Kn = \frac{l}{\delta}, \quad (4)$$

где  $l$  – средняя длина свободного пробега молекул газа,  $м$ ;  $\delta$  – определяющий размер объекта, в котором перемещается газ,  $м$ .

Число Кнудсена показывает отношение средней длины свободного пробега молекул газа к размеру объекта, в котором они перемещаются.

В ячеистых материалах передача тепла осуществляется теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией [7]. Механизм переноса тепла характеризуется критерием Кнудсена (3).

Допустим, что в материалах имеются поры размером 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 мм. Результаты расчета симплекса Кнудсена представлены

в табл. 5. Расчеты, произведенные по методике [2] совпадают с табличными данными авторов [8, 9].

Таблица 5

## Значения критерия Кнудсена

Материал	Критерий $Kn, \times 10^{-2}$ , для ячеек размером, мм										
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пенобетон (азот)	0,213	0,107	0,053	0,036	0,027	0,021	0,018	0,015	0,013	0,012	0,011
(кислород)	0,236	0,118	0,059	0,039	0,029	0,024	0,020	0,016	0,014	0,013	0,012
Газобетон (водород)	0,238	0,119	0,059	0,039	0,029	0,024	0,019	0,017	0,015	0,013	0,012

Из табл.5 видно, что во всех случаях  $Kn \ll 1$ . Это говорит о том, что перенос тепла в данном случае осуществляется теплопроводностью (кондукцией). В области малых диаметров пор симплексе Кнудсена для газобетона примерно на 10 % больше, чем в пенобетоне, что говорит о том, что в газобетоне теплопроводность газа и теплового пограничного слоя больше, чем в пенобетоне.

Анализ результатов работы [7] показывает, что конвекция в горизонтальном слое пористого материала, подогреваемого снизу, начинается при критическом значении критерия Рэлея  $Ra_{кр} > 40$ . Для строительной отрасли наибольший практический интерес представляет случай, когда существует градиент температуры в горизонтальном направлении.

**Выводы.** При вертикальном нагреве движущей силой конвективных струй являются два фактора: градиент температур и градиент плотности, а при горизонтальном – только градиент температур, роль плотности снижается с уменьшением диаметра пор и капилляров материала. Исходя из этого, можно сделать достаточно обоснованное предположение, что при горизонтальном потоке переноса тепла переход на конвективный теплообмен будет происходить при критическом значении числа Рэлея существенно больше 40.

Сопоставление расчетных данных, представленных в табл. 4 и 5 приводят к выводу, что в поробетонах строительного назначения конвективной составляющей теплопереноса можно пренебречь.

При учете переноса тепла в строительных материалах в порах достаточно малого диаметра все пространство занимает тепловой пограничный слой, следовательно, теплоперенос по всей поре происходит путем теплопроводности. Если диаметр поры превышает определенный размер, то в ней возможен и конвективный перенос, который отличается большей интенсивностью в сравнении с теплопроводностью. Из приведен-

ных данных следует вывод, что в пено- и газобетонах, в которых диаметр пор не превышает 2–3 мм, конвективная составляющая теплопереноса не играет существенной роли, если температура не превышает 20–50 °С.

Коэффициент теплопроводности, по крайней мере, для теплоизоляционных ячеистых материалов (пенобетон, газобетон), при средней плотности не более 300–400 кг/м<sup>3</sup>, при температуре до 30–40 °С мало зависит от формы, размера ячеек, свойств межпоровых перегородок. При увеличении градиента температур, увеличении диаметра пор до 5 мм и более влияние указанных показателей возрастает.

*\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с нем. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1983. 520 с.
3. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 128 с.
4. Аниканова Т.В. Теплоизоляционные пенобетоны с ускоренным схватыванием. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Белгород. 2007. 169с.
5. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Погромский А.С. Влияние теплового пристенного слоя на теплопроводность пористых и зернистых материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 42–46.
6. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. О влиянии теплового пограничного слоя на теплотехнические характеристики строительных материалов // Чтения РААСН. Научные и инженерные проблемы строительной-технологической утилизации техногенных отходов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2014. С. 179–184.

7. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. Справочное изд. М.: Металлургия, 1982. 152с.

8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматиз, 1963. 708 с.

9. Цедерберг Н.Б. Теплопроводность газов и жидкостей. М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408с.

---

**Anikanova T.V, Rakhimbaev Sch. M., Pogromskiy A.S.**

**THE APPLICATION OF SIMILARITY THEORY IN THE ANALYSIS OF THE PROCESSES OF PRODUCTION AND OPERATION OF CELLULAR CONCRETE**

*For insulating building materials, especially cellular, play a big role in heat transfer processes in the pores. The use of criteria of similarity allows to obtain additional information on heat transfer processes that occur in the material, giving the possibility to predict and optimize the pore structure of the material in the process of production and operation.*

*Grashof criterion characterizes the stage of formation of the pore structure of foam concrete and aerated concrete. Under other equal conditions during the formation of structure in the foam concrete has more favorable conditions for the growth of the bubble than in aerated concrete. The higher the value of the Prandtl number, the worse the working of the thermal boundary layer. The calculations showed that the thermal boundary layer in the aerated concrete will work somewhat worse than in the foam concrete.*

**Keywords:** *heory of similarity, criterion of similarity, coefficient of thermal conductivity, thermal boundary layer.*

---

**Аниканова Татьяна Викторовна**, кандидат технических наук, доцент.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.  
E-mail: anik.tv@yandex.ru

**Рахимбаев Шарк Матрасулович**, доктор технических наук, профессор.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Погромский Алексей Сергеевич**, старший преподаватель.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.  
E-mail: pogrom7@yandex.ru