

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНОБЕТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕНОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Попов М. А. – аспирант

*Кубанский государственный аграрный университет*

В статье представлен метод определения физико-механических характеристик пенобетона, необходимых для расчета пенобетонных конструкций.

In the article the method of definition of physicomachanical characteristics of the foam concrete necessary for calculation of foam concrete designs is submitted.

При выборе строительных материалов для конструкций зданий и сооружений необходимо, с одной стороны, обеспечить заданную несущую способность, с другой стороны, теплоизоляционные характеристики конструкции должны быть достаточными для условий эксплуатации [1; 2].

Объектом испытаний были пенобетонные балочки стандартного размера 10x10x40 см [3; 4].

В состав пенобетонной смеси вошли следующие материалы:

- портландцемент [5];
- мелкий заполнитель (речной песок);
- пластификатор (строительная известь [6]);
- техническая пена;
- вода.

Техническая пена готовилась с использованием лабораторного пеногенератора, обеспечивающего интенсивное воздухововлечение при постоянной аэрации всего рабочего объема пенообразователя, на основе пенообразователя СДО [7] и известкового молока, играющего роль стабилизатора

технической пены, и вводилась в готовом виде в приготовленную пенобетонную смесь.

Для армирования применялся пространственный каркас, состоящий из продольной металлической арматуры периодического профиля  $A I \varnothing 8$  мм и поперечной проволочной арматуры  $B I \varnothing 3$  мм, связанных между собой вязальной проволокой. Степень полного армирования сечения балочек – 2 %, армирования растянутой зоны сечения – 1 %.

Армирующий каркас и пенобетонная смесь укладывались в формы, где пенобетонная смесь твердела первые сутки, накрытая влажной тканью при температуре  $20^{\circ}C$ . Затем формы помещались в камеру нормального твердения и твердели в камере до истечения 28 суток со дня формования. Приготовление образцов с разными сочетаниями исследуемых параметров происходило с интервалом в одни сутки для удобства дальнейшего испытания.

Перед испытанием была определена средняя плотность образцов и сравнена с плотностью пенобетонной смеси (табл. 1).

**Таблица 1 – Средняя плотность пенобетона до и после твердения**

Расчетная плотность, $кг / м^3$	Фактическая плотность, $кг / м^3$	
	до твердения	после твердения
1500	1494	1370
1800	1792	1689

Исследования проводились с использованием метода полного факторного эксперимента (далее ПФЭ) типа  $2^n$ , где  $n$  – количество исследуемых параметров (в данном опыте  $n=2$ ) [8].

В качестве исследуемых технологических факторов были приняты следующие:

$X_1$  – средняя плотность пенобетонной смеси со средним уровнем 1650 кг/м<sup>3</sup> и интервалом варьирования 150 кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – площадь сечения арматуры в растянутой зоне образца со средним уровнем 0,505 см<sup>2</sup> и интервалом варьирования 0,505 см<sup>2</sup>.

В качестве отклика  $Y$  определялась прочность балочек на растяжение, вычисляемая по формуле:

$$R_{раст} = 0,58 \cdot R_{изг}, \quad (1)$$

где  $R_{изг}$  – прочность балочек на изгиб, полученная по формуле:

$$R_{изг} = \frac{M_{изг}}{W}, \quad (2)$$

где  $M_{изг}$  – разрушающий изгибающий момент в поперечном сечении балочки, вычисляемый по формуле (3);

$W$  – момент сопротивления поперечного сечения балочки.

$$M_{изг} = \frac{P_p \cdot l}{4}, \quad (3)$$

где  $P_p$  – разрушающая нагрузка;

$l = 30$  см – пролет балочки (расстояние между опорами) [3].

Условия планирования эксперимента приведены в таблице 2, а матрица планирования эксперимента и результаты испытаний пенобетона приведены в таблице 3.

**Таблица 2 – Условия эксперимента**

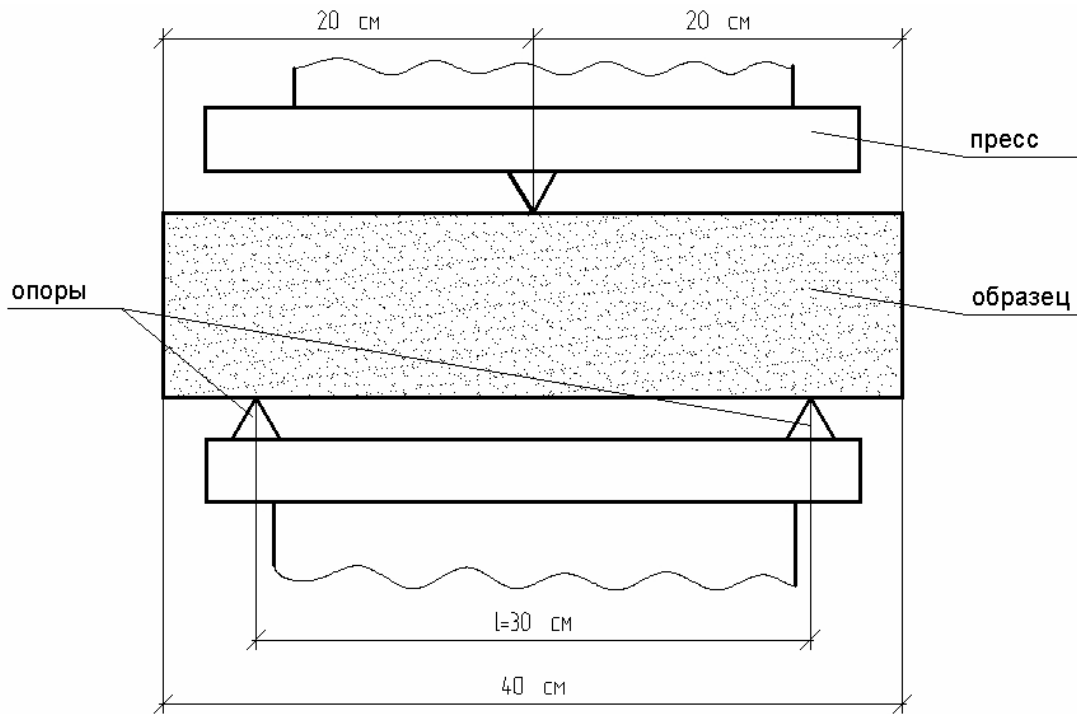
Обозначения	Плотность пенобетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>		Площадь сечения растянутой арматуры, см <sup>2</sup>	
	код. знач.	физ. знач.	код. знач.	физ. знач.
	$x_1$	$X_1$	$x_2$	$X_2$
Основной уровень, $X_{0i}$	0	1650	0	0,505

Интервал варьирования	-	150	-	0,505
Верхний уровень, $X_{vi}$	1	1800	1	1,01
Нижний уровень, $X_{ni}$	-1	1500	-1	0,0

**Таблица 3 – Матрица планирования и результаты эксперимента**

Номер опыта	Значения факторов				Значение откликов			
	Плотность пенобетонной смеси, $кг/м^3$		Площадь сечения растянутой арматуры, $см^2$		Прочность пенобетона на растяжение, МПа			
	код. знач.	физ. знач.	код. знач.	физ. знач.				
	$x_1$	$X_1$	$x_2$	$X_2$	$y_{01}$	$y_{02}$	$y_{03}$	$y_{cp}$
1	-1	1500	-1	0	1,507	1,617	1,672	1,599
2	1	1800	-1	0	2,878	2,686	2,275	2,613
3	-1	1500	1	1,01	5,481	4,248	4,275	4,668
4	1	1800	1	1,01	9,318	11,263	11,483	10,688

Испытание образцов проводилось на лабораторном прессе (схема испытания представлена на рисунке 1).

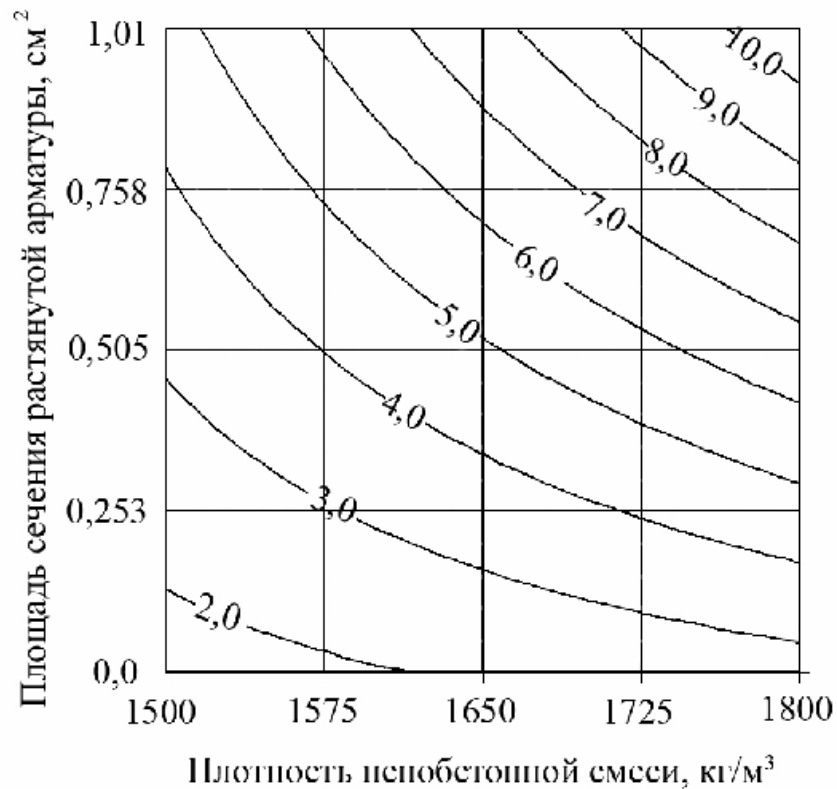


**Рисунок 1 – Схема испытания пенобетонных образцов**

По экспериментальным значениям откликов были найдены коэффициенты уравнения регрессии, проверка которого на равнозначность и адекватность позволила получить для прочности пенобетона на растяжение следующее уравнение регрессии:

$$Y = 4,892 + 1,759X_1 + 2,786X_2 + 1,252X_1X_2. \quad (4)$$

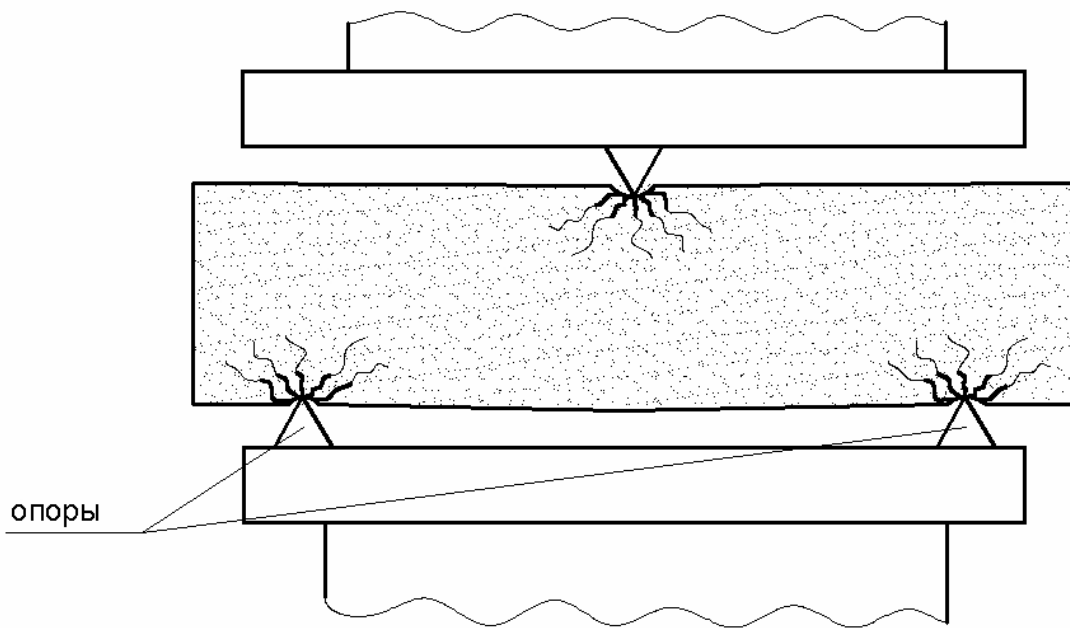
На основе полученных данных построен график изменения отклика от двух исследуемых факторов. Величины откликов даны в виде линий равного уровня – изолиний (рис. 2).



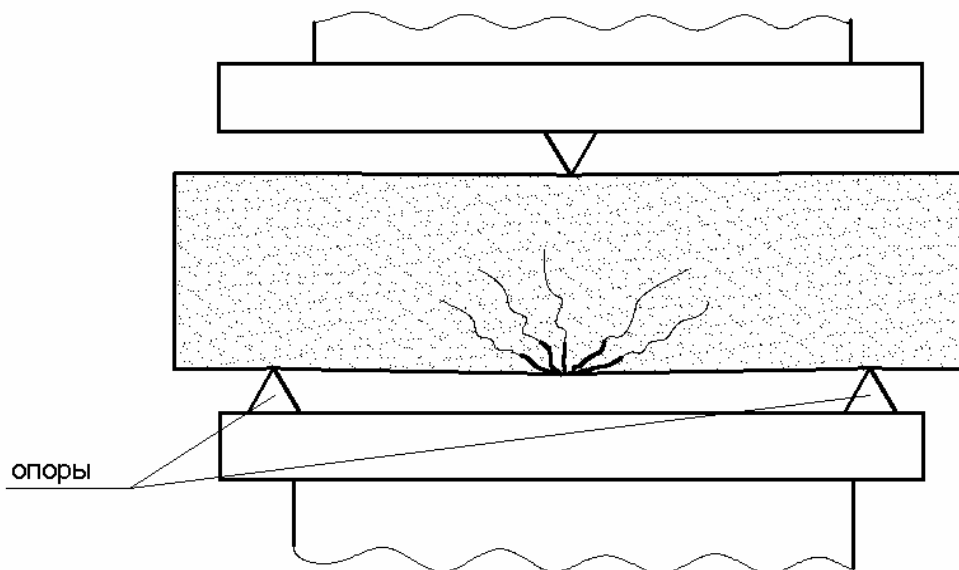
**Рисунок 2 – Изолинии зависимости прочности пенобетона на растяжение (МПа) от плотности пенобетонной смеси и площади сечения арматуры в растянутой зоне**

Полученное уравнение регрессии показало, что в указанном диапазоне исследования армирование и плотность неоднозначно влияют на прочность пенобетона, причем при снижении плотности пенобетона эффект армирования снижается и, наоборот, при повышении плотности эффект армирования повышается.

Характер разрушения образцов показал, что при армировании разрушение происходит в значительной мере от смятия образцов в месте опоры, в то время как при испытании неармированного пенобетона разрушение происходит из-за разрыва в растянутой зоне образца (рис. 3, 4).



**Рисунок 3 – Схема разрушения армированных образцов**



**Рисунок 4 – Схема разрушения неармированных образцов**

Расчеты пенобетонных конструкций на прочность помимо расчетного сопротивления требуют также определения таких характеристик пенобетона, как модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига.

Определение модуля упругости пенобетона проводилось с использованием трех пенобетонных образцов размерами 10x10x30 см [1; 2; 9] и одного образца для определения разрушающей нагрузки.

В состав пенобетонной смеси вошли следующие материалы:

- портландцемент [5];
- мелкий заполнитель (речной песок);
- пластификатор (строительная известь [6]);
- техническая пена;
- вода.

Техническая пена готовилась с использованием лабораторного пеногенератора, обеспечивающего интенсивное воздухововлечение при постоянной аэрации всего рабочего объема пенообразователя, на основе пенообразователя СДО [7] и известкового молока, играющего роль стабилизатора технической пены, и вводилась в готовом виде в приготовленную пенобетонную смесь.

Модуль упругости определяется по формуле:

$$E_{\sigma} = \frac{\sum^n E'_{\sigma}}{n}, \quad (5)$$

где  $E'_{\sigma}$  – модуль упругости одного образца, вычисляемый по результатам испытаний по формуле (6);

$n = 3$  – количество испытываемых образцов.

$$E'_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{2ym} - \varepsilon_{1ym}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1$  – нормальное напряжение при нагрузке, равной  $0,1 P_{np}$ ;

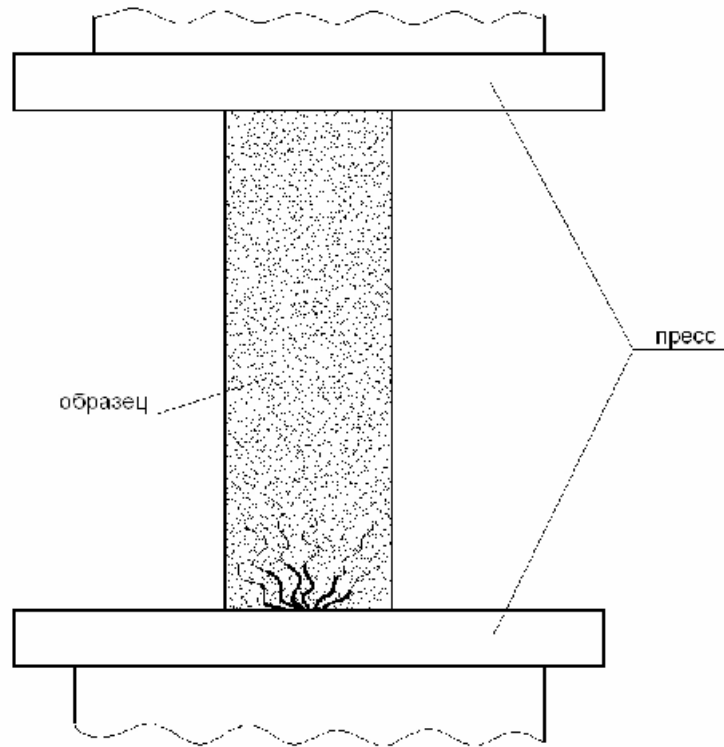
$\sigma_2$  – нормальное напряжение при нагрузке, равной  $0,5 P_{np}$ ;

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительная продольная упругая деформация, возникающая сразу после приложения нагрузки, соответственно при  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ;



$P_{np}$  – разрушающая нагрузка, определяемая при осевом сжатии одного (контрольного) образца.

Схема разрушения после определения  $P_{np}$  показана на рисунке 5.



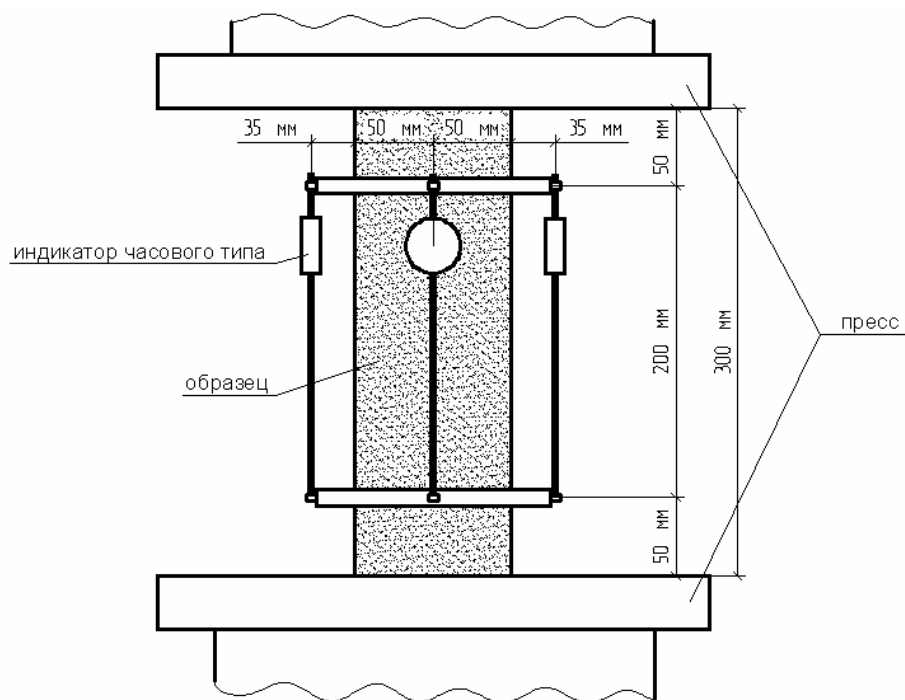
**Рисунок 5 – Схема разрушения образца при осевом сжатии**

В результате испытаний были получены следующие значения  $E_{\sigma}$  (табл. 4).

**Таблица 4 – Результаты определения модуля упругости пенобетона**

№ испытания	$E'_{\sigma}$ , МПа	$E_{\sigma}$ , МПа	$\Delta E_{\sigma}$ , %
1	9602,401	9356,36	+2,56
2	9356,360		0
3	9110,320		-2,56

Испытание образцов проводилось на лабораторном прессе (рис. 6).



**Рисунок 6 – Схема испытания пенобетонных образцов**

Коэффициент Пуассона определяется с использованием трех пенобетонных образцов с размерами 10x10x30 см [1] и вычисляется по формуле:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum \mu' \quad (7)$$

где

$$\mu' = \frac{\varepsilon_{\text{поп.ум}}}{\varepsilon_{\text{прод.ум}}} \quad (8)$$

$\varepsilon_{\text{поп.ум}}$  – приращения относительных упругих поперечных деформаций при  $0,3 P_{\text{пр}}$ ;

$\varepsilon_{\text{прод.ум}}$  – приращения относительных упругих продольных деформаций при  $0,3 P_{\text{пр}}$ .

Относительные упругие деформации определяются по формулам:

$$\varepsilon_{\text{поп.ум}} = \varepsilon_{\text{поп}} - \Sigma \varepsilon_{\text{поп.пм}}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{прод.ум}} = \varepsilon_{\text{прод}} - \Sigma \varepsilon_{\text{прод.нм}}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{\text{поп}}$  – приращения полных относительных поперечных деформаций при  $0,3 P_{\text{пр}}$ , замеренные в конце ступени приложения нагрузки;

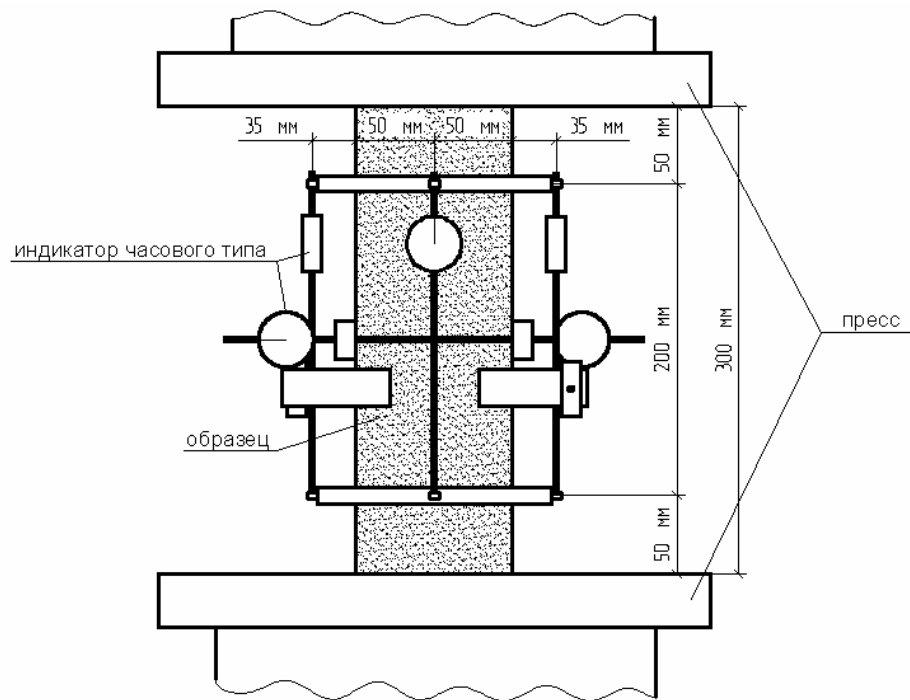
$\varepsilon_{\text{прод}}$  – приращения полных относительных продольных деформаций при  $0,3 P_{\text{пр}}$ , замеренные в конце ступени приложения нагрузки;

$\varepsilon_{\text{поп.нм}}$  – приращения относительных поперечных деформаций быстронатекающей ползучести, полученные при выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня  $0,3 P_{\text{пр}}$ ;

$\varepsilon_{\text{прод.нм}}$  – приращения относительных продольных деформаций быстронатекающей ползучести, полученные при выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня  $0,3 P_{\text{пр}}$ .

Подготовка эксперимента аналогична описанному выше, расчетная плотность пенобетонной смеси была принята равной  $1800 \text{ кг/м}^3$ .

Испытание образцов проводилось на лабораторном прессе (рис. 7) по стандартной методике [1].



**Рисунок 7 – Схема испытания пенобетонных образцов**

В результате испытаний были следующие значения  $\mu$  (табл. 5).

**Таблица 5 – Результаты определения коэффициента Пуассона**

№ испытания	$\mu'$	$\mu$
1	0,18028	0,14419
2	0,14419	
3	0,10810	

Модуль сдвига  $G$  пенобетона определяется по результатам предыдущих испытаний по формуле:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (11)$$

где  $E = 9356,36$  МПа – модуль упругости пенобетона;

$\mu = 0,14419$  – коэффициент Пуассона пенобетона.

Модуль сдвига  $G$  пенобетона равен:

$$G = \frac{9356,36}{2(1+0,14419)} = 4088,639 \text{ МПа.}$$

## Список литературы

1. Широкогородюк, В. К. Оптимизация технологических параметров получения неавтоклавного пенобетона / В. К. Широкогородюк, Е. А. Дмитриев, С. А. Абрамов // Проектирование, строительство и техническая эксплуатация зданий и сооружений агропромышленного комплекса Кубани. Труды. – Краснодар : КубГАУ, 1999. – Выпуск 369 (397). – С. 83–86.
2. Разработка технологии пенобетона с управляемой структурой с целью обеспечения энергосбережения при эксплуатации зданий и сооружений / В. К. Широкогородюк, С. Ю. Орленко, С. А. Абрамов, Т. В. Широкогородюк // Проектирование, строительство и техническая эксплуатация зданий и сооружений. Труды. – Краснодар : КубГАУ, 2002. – С. 80–84.
3. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
4. ГОСТ 12852.0–77. Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний.
5. ГОСТ 10178–85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
6. ГОСТ 9179–77. Известь строительная. Технические условия.
7. ТУ 13–05–02.
8. Методические рекомендации по планированию эксперимента в технологии стройматериалов. – Челябинск : УралНИИСтромпроект, 1973.
9. ГОСТ 24452–80. Бетоны. Методы испытаний.