

УДК 666.942

**БЕЛИТОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ****В.И. Турчанинов**

Оренбургский государственный университет, Российская Федерация

e-mail: tutuche@mail.ru

*Рассмотрены вопросы расширения номенклатуры вяжущих веществ, используемых в строительстве. Указаны достоинства предлагаемого белитового цемента в сравнении с традиционным портландцементом, такие как более низкая температура обжига, снижение расхода топлива на обжиг, сокращение выбросов вредных для экологии газов из печей. Указаны способы повышения активности белитового цемента в ранние сроки твердения. Приведена методика расчета состава клинкера белитового цемента, приведен расчет экономической эффективности предлагаемой технологии.*

**Ключевые слова:** белитовый цемент, клинкер, расчет, экология, силикатный модуль, коэффициент насыщения.

**WHITEWASH BINDER: PROBLEMS AND SOLUTIONS****V. Turchaninov**

Orenburg State University, Russian Federation

e-mail: tutuche@mail.ru

*The issues of expanding the nomenclature of binders used in construction are considered. The advantages of the proposed belite cement in comparison with traditional Portland cement are indicated, such as a lower firing temperature, reduced fuel consumption for firing, and reduced emissions of environmentally harmful gases from furnaces. The ways of increasing the activity of belite cement in the early stages of hardening are indicated. The method of calculating the composition of clinker of white cement is given, the calculation of the economic efficiency of the proposed technology is given.*

**Keywords:** white cement, clinker, calculation, ecology, silicate layer, saturation coefficient.

Основным вяжущим, широко применяемым в строительстве, является портландцемент. Мировое производство цемента в 2019 году составило 4,1 млрд т, из них 2,2 млрд т пришлось на Китай. В России уровень производства составил всего 57 млн т.

Портландцемент производится весьма широкой номенклатуры, поскольку условия эксплуатации бетонных сооружений и конструкций существенно различаются и если в одном случае необходим быстрый набор прочности бетона, то в другом высокая стойкость к агрессивному воздействию внешней среды.

Процесс производства портландцемента энергоемкий и сопровождается значительным выбросом в атмосферу углекислого и сернистого газов, что негативно сказывается на экологии. В 1960 году количество выбросов составило порядка 9411 Мегатонн (9,4 Гт). Лидирующие позиции по выбросам углекислоты занимали США, Россия (без учета союзных республик) и Германия. На 4 месте шел Китай, затем страны Европы, Востока и т. д. Но в последние годы Китай

с его развитой промышленностью и высоким уровнем производства цемента уверенно вышел на первое место в мире по выбросам  $\text{CO}_2$ . В 2017 году выбросы составили, в Мт: Китай - 9839, США – 5270, Индия - 2470, Россия – 1693. Глобальные выбросы  $\text{CO}_2$  в 2018 году составили порядка 37,1 Гт. Это приблизительно на 2,7 % больше, чем в предыдущем году (36,1 Гт) [1]. Вопросам снижения выбросов упомянутых газов в последнее время уделяется значительное внимание.

Ряд авторов в качестве одного из путей снижения выбросов отходящих газов из печей для обжига клинкера предлагают уменьшение содержания алита ( $\text{C}_3\text{S}$ ) в клинкере за счет увеличения в нем содержания белита ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Но это решает проблему лишь частично, т.к. в клинкере всё равно остается значительное количество алита. Также предлагается частично заменять известняк в составе исходной сырьевой смеси шлаками черной металлургии, содержащими значительное количество оксида кальция  $\text{CaO}$  (более 40 %) [2]. И опять-таки – это всего лишь частичное решение проблемы.

Коренное решение этой проблемы, на наш взгляд, заключается в расширении номенклатуры вяжущих материалов на основе клинкера, в котором преобладает белит, при полном отсутствии алита [3]. Наряду с белитом в составе такого «белитового цемента» присутствуют низкоосновные алюминаты и ферриты кальция. Для улучшения условий обжига клинкера и стабилизации белита в его термодинамически устойчивой форме  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в состав сырьевой смеси следует вводить добавку гипса двуводного либо ангидрита; при этом малоактивные алюминаты связываются в сульфоалюминаты большей гидравлической активности. Это также способствует повышению сульфатостойкости цемента. Следует также отметить, что обжиг клинкера белитового цемента протекает при температуре на 200–250 °С ниже, чем традиционного портландцементного, и сопровождается значительно меньшим выбросом в атмосферу вредных газов, а также меньшим расходом топлива.

Производителей и потребителей традиционного портландцемента, как правило, смущает отсутствие алита в составе клинкера, т.к. именно он обеспечивает рост прочности в начальные сроки твердения цемента. Но следует заметить, что не всегда и не везде необходим быстрый набор прочности бетона. Для ряда сооружений, в частности гидротехнических, важнее умеренная экзотермия твердеющего бетона нежели быстрый рост прочности. В поздние сроки, начиная с 3 месяцев, отмечается интенсивное нарастание прочности белитового цемента [4].

Коэффициент стойкости бетонных конструкций на основе рядового портландцемента также невысок, гораздо менее 0,8. В то же время коэффициент стойкости белитового цемента превышает 1,0 и может достигать 3,5 [4].

Поскольку меняется минералогический состав клинкера, то и существующие методики расчета состава сырьевой смеси нуждаются в корректировке. За основу нами принята ступенчатая методика расчета, предложенная Коганом Л.С. Ниже приводится методика расчета химического и минералогического состава клинкера белитового цемента применительно к сырьевой базе Новотроицкого цементного завода, который в настоящее время перевели на выпуск другой продукции (пропантов). Более целесообразно было бы перевести завод на выпуск белитового цемента, характеризующегося высокой сульфатостойкостью.

Сырьевая смесь рассчитывается исходя из химического состава сырьевых компонентов и заданных модульных характеристик клинкера – коэффициента насыщения (КН) и силикатного модуля ( $n_{\text{кл}}$ ).

При проведении расчета химический состав компонентов необходимо привести к 100 %. Если сумма отличается от 100 %, то химический состав компонентов пересчитывается на 100 %

путём добавления в «прочие» ( $\Sigma < 100$ ) или умножения на коэффициент  $K_{пер.}$ , если сумма больше 100 %. В таблице 1 приведен химический состав компонентов Новотроицкого цементного завода в пересчете на 100 %.

Рассчитывается силикатный модуль известняка ( $n_{изв.}$ ), глины ( $n_{гл.}$ ), песка ( $n_{п.}$ ) и колошниковой пыли ( $n_{кп.}$ ) по формуле 1.

$$n = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$n_{изв.} = \frac{4,02}{1,09 + 2,44} = 1,14; \quad n_{гл.} = \frac{53,21}{13,35 + 5,84} = 2,774$$

$$n_{п.} = \frac{92,31}{3,84 + 0,65} = 20,56; \quad n_{кп.} = \frac{11,0}{1,85 + 63,01} = 0,17.$$

Таблица 1. – Химический состав компонентов в пересчете на 100 %

Компонент	Химический состав, в %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	ППП	Проч.	Сумма
Известняк	51,32	4,02	1,09	2,44	0,56	-	40,57	-	100,0
Глина	10,13	53,21	13,35	5,84	1,90	1,43	9,75	4,39	100,0
Кол. пыль	10,8	11,0	1,85	63,01	1,86	-	-	11,48	100,0
Песок	-	92,31	3,84	0,64	-	-	1,55	1,66	100,0

Для выбора корректирующего (третьего – основные компоненты – известняк и глина) компонента сырьевой смеси сравниваются полученные  $n_{изв.}$  и  $n_{гл.}$  с заданным силикатным модулем клинкера -  $n=1,5$ ,  $КН=1,0$  [4].

Принимаем трехкомпонентную сырьевую смесь и проводим её корректировку по  $n=1,5$  и  $КН=1,0$ . Для этого сравниваем полученные  $n_{изв.}$  и  $n_{гл.}$  с заданным силикатным модулем клинкера  $n=1,5$ .

Корректировка по  $n$ : известняк корректируем глиной, а глину колошниковой пылью.

Расчёт составов откорректированных известняка и глины производим по формулам 2 и 3. Полученные соотношения пересчитываем в процентах ( $x$  и  $y$ ;  $x'$  и  $y'$ ).

$$\frac{\text{глина}}{\text{известняк}} = \frac{[SiO_2 - n_{кп.} (Al_2O_3 + Fe_2O_3)]_{изв.}}{[n_{кп.} (Al_2O_3 + Fe_2O_3) - SiO_2]_{гл.}} \quad (2)$$

$$\frac{\text{кол.пыль}}{\text{глина}} = \frac{[SiO_2 - n_{кп.} (Al_2O_3 + Fe_2O_3)]_{гл.}}{[n_{кп.} (Al_2O_3 + Fe_2O_3) - SiO_2]_{кол.пыль}} \quad (3)$$

$$\frac{\text{глина}}{\text{известняк}} = \frac{[4,02 - 1,5 (1,09 + 2,44)]}{[1,5 \cdot (13,35 + 5,84) - 53,21]} = \frac{-1,275}{-24,425}$$

Сумма:  $1,275 + 24,425 = 25,7$

25,7 – 100 %

24,425 – X %       $X = 24,425 \cdot 100 / 25,7 = 95,04$  % - доля известняка

25,7 – 100 %

1,275 – Y %       $Y = 1,275 \cdot 100 / 25,7 = 4,96$  % - доля глины

$$\frac{\text{кол.пыль}}{\text{глина}} = \frac{[53,21 - 1,5 (13,35 + 5,84)]}{[1,5 \cdot (1,85 + 63,01) - 11]} = \frac{24,425}{86,29}$$

Сумма: 24,425+86,29=110,715

110,715 - 100 %

24,425 -  $X'$  %  $X' = 24,425 \cdot 100 / 110,715 = 22,06$  % - доля кол. пыли.

110,715 - 100 %

86,29 -  $Y'$  %  $Y' = 86,29 \cdot 100 / 110,715 = 77,94$  % - доля глины

Таблица 2. – Химический состав откорректированных материалов

Компоненты	Химический состав, в %									n
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	ППП	Проч.	сумма	
95,04 % изв.	48,77	3,82	1,03	2,32	0,53	-	38,56	-	95,03	
4,96 % гл.	0,50	2,61	0,65	0,29	0,09	0,07	0,48	0,21	4,90	
Известняк 1	49,27	6,43	1,68	2,61	0,62	0,07	39,04	0,21	99,93	1,5
77,94 % гл.	7,89	41,47	10,40	4,55	1,48	1,11	7,60	3,42	77,92	
22,06 % к.п.	2,38	2,43	0,41	13,90	0,41	-	-	2,53	22,06	
Глина 1	10,27	43,90	10,81	18,45	1,89	1,11	7,60	5,95	99,98	1,5

Для проверки правильности расчёта определяем силикатные модули откорректированных известняка и глины и сравниваем с заданным значением  $n_{кл}$ . Отклонение не должно превышать  $\pm 0,01$ .

$$n_{изв1} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{6,43}{1,68 + 2,61} = 1,499 \approx 1,5,$$

$$n_{глина1} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{43,9}{10,81 + 18,45} = 1,50.$$

$n_{кл} = 1,5$ , следовательно, расчёт был выполнен верно.

Далее проводится корректировка по КН и определение состава сырьевой смеси. Для этого вычисляем процентное соотношение между откорректированными известняком 1 и глиной 1 по формуле 4. Результаты сводим в таблицу 3.

$$\frac{\text{известняк 1}}{\text{глина 1}} = \frac{[1,87SiO_2 \cdot КН + 0,55Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3 - CaO]_{глины 1}}{[CaO - (2,8SiO_2 \cdot КН + 0,55Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3)]_{известняка 1}} \quad (4)$$

$$\frac{\text{известняк 1}}{\text{глина 1}} = \frac{[1,87 \cdot 43,9 \cdot 1 + 0,55 \cdot 10,81 + 0,7 \cdot 18,45 - 10,27]}{[49,27 - (1,87 \cdot 6,43 \cdot 1 + 0,55 \cdot 1,68 + 0,7 \cdot 2,61)]} = \frac{90,68 \text{ изв. 1}}{34,5 \text{ гл. 1}}$$

Сумма: 90,68 + 34,5 = 125,18

125,18 - 100 %

90,68 -  $z$  %  $z = 90,68 \cdot 100 / 125,18 = 72,44$  % - доля известняка 1

125,18 - 100 %

34,5 -  $q$  %  $q = 34,5 \cdot 100 / 125,18 = 27,56$  % - доля глины 1

Содержание компонентов в сырьевой смеси, в %, рассчитываем по формулам

$$\text{Известняк} \quad \frac{x \cdot z}{100} = \frac{72,44 \cdot 95,04}{100} = 68,85$$

$$\text{Глина } \left( \frac{y \cdot z}{100} + \frac{x \cdot q}{100} \right) = \left( \frac{4,96 \cdot 72,44}{100} + \frac{77,94 \cdot 27,56}{100} \right) = 25,07$$

$$\text{Колошниковая пыль } \frac{x \cdot q}{100} = \frac{22,06 \cdot 27,56}{100} = 6,08$$

Сумма компонентов: известняк + глина + колошниковая пыль = 68,85 + 25,07 + 6,08 = 100 %

На основе полученного соотношения компонентов сырьевой смеси рассчитываем её химический состав и сводим в таблицу 3.

Таблица 3. – Химический состав сырьевой смеси и клинкера

Компоненты	Химический состав, в %									n
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	ППП	Проч.	Сумма	
68,85 % известняка	35,33	2,77	0,75	1,68	0,38	-	27,93	-	68,84	
25,07 % глины	2,54	13,34	3,35	1,46	0,48	0,36	2,44	1,10	25,07	
6,08 % кол.пыль	0,66	0,67	0,11	3,83	0,11	-	-	0,70	6,08	
Сырьевая смесь	38,53	16,78	4,21	6,97	0,97	0,36	30,37	1,80	99,99	1,5
Клинкер	55,33	24,10	6,04	10,00	1,39	0,52	-	2,58	99,96	1,5

Химический состав клинкера определяется с учётом коэффициента пересчёта

$$K_{\text{пер}} = \frac{100}{100 - \text{ппп}_{\text{с.с.}}} = \frac{100}{100 - 30,37} = 1,436, \quad (5)$$

где  $\text{ппп}_{\text{с.с.}}$  – потери при прокаливании сырьевой смеси (таблица 3).

С целью проверки правильности второй части расчёта определяется коэффициент насыщения клинкера по формуле

$$KH = \frac{\text{CaO} - (0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3)}{1,87\text{SiO}_2} \quad (6)$$

$$KH = \frac{55,33 - (0,55 \cdot 6,04 + 0,7 \cdot 10,00)}{1,87 \cdot 24,10} = 1,00$$

Рассчитываем минералогический состав клинкера, исходя из соотношения между массами оксидов, входящих в состав минералов:

$$CA: \text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 56 / 102 = 0,55$$

$$C_2F: 2\text{CaO} / \text{Fe}_2\text{O}_3 = (2 \cdot 56) / 160 = 0,7$$

$$C_2S: 2\text{CaO} / \text{SiO}_2 = (2 \cdot 56) / 60 = 1,87$$

$$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = 56 + 102 = 158; \quad 158 / 102 = 1,55; \quad 6,04 \cdot 1,55 = 9,36 \%$$

$$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (2 \cdot 56) + 60 = 172; \quad 172 / 60 = 2,87; \quad 2,87 \cdot 24,1 = 69,17 \%$$

$$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = (2 \cdot 56) + (2 \cdot 56 + 3 \cdot 16) = 272; \quad 272 / 160 = 1,7; \quad 1,7 \cdot 10,00 = 17,00 \%$$

Сумма: 9,36 + 69,17 + 17,00 = 95,53 %. Прочие оксиды: ( $\text{MgO} + \text{SO}_3 + \text{Проч.}$ ) = 1,39 + 0,52 + 2,58 = 4,49 %.

Таким образом на 1 т клинкера без добавки гипса приходится, кг:  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  – 93,6;  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – 691,7;  $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  – 170; прочих, не связанных с указанными минералами – 44,9. Итого – 1000 кг.

Убедившись в точности расчёта состава сырьевой смеси, определим удельный расход сырьевых материалов  $C$  ( $t/T_{кл}$ ) по формуле 7:

$$C = \frac{J \cdot C_1}{100}, \quad (7)$$

где  $J$  – удельный расход сырьевой смеси,  $t/T_{кл}$  (равен  $K_{пер}$ );

$C_1$  – содержание каждого компонента сырьевой смеси, %.

$$C_{изв} = \frac{1436 \cdot 68,84}{100} = 988,5 \text{ кг},$$

$$C_{глина} = \frac{1436 \cdot 25,07}{100} = 360,0 \text{ кг},$$

$$C_{кол.пыль} = \frac{1436 \cdot 6,08}{100} = 87,3 \text{ кг},$$

Итого:  $988,5 + 336,0 + 87,3 = 1436$  кг

Полученные результаты используются в дальнейших расчётах.

Расход гипса двухводного принимаем, исходя из 100 % связывания  $CA$  в  $3CA \cdot CaSO_4$  и 10 % связывания  $C_2S$  в  $2C_2S \cdot CaSO_4$

$$3(CaO \cdot Al_2O_3) \cdot CaSO_4 \quad 3(56+102)+(40+32+4 \cdot 16) = 610$$

$$\text{Соотношение между } CaSO_4 \text{ и } 3CA: \quad CaSO_4/3CA = 136/474 = 0,29$$

$$\text{Соотношение между } CaSO_4 \text{ и } C_2S: \quad CaSO_4/2C_2S = 136/(2 \cdot 172) = 0,39$$

$$CaSO_4 \text{ для связывания } CA - 93,6 \cdot 0,29 = 27,14 \text{ кг}$$

$$CaSO_4 \text{ для связывания } 10 \% C_2S - 0,1 \cdot 691,7 \cdot 0,39 = 27,0 \text{ кг}$$

$$\text{Итого } CaSO_4: 27,14 + 27,0 = 54,14 \text{ кг. В пересчете на } CaSO_4 \cdot 2H_2O = 1,26 \cdot 54,14 = 68,2 \text{ кг.}$$

С учетом чистоты гипса (содержание  $SO_3$  в гипсовом камне равно 44,2 %)

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = SO_3 \cdot 2,15 = 44,2 \cdot 2,15 = 95 \% \text{ в гипсовом камне.}$$

$$K_{пер} = 100/95 = 1,05$$

Таким образом в расчетную сырьевую смесь дополнительно нужно ввести  $68,2 \cdot 1,05 = 71,6$  кг гипсового камня в сухом состоянии.

Если ориентироваться на Новотроицкий цементный завод, оборудованный тремя вращающимися печами диаметром 3,6 и длиной 127 м, то годовой выпуск клинкера с учетом повышения производительности печей за счет снижения температуры обжига составит

$$Q_{кл} = n \cdot q \cdot 8760 \cdot K_{п} = 3 \cdot 27 \cdot 8760 \cdot 0,9 = 638604 \text{ т/год}$$

С учетом ввода в состав цемента 10 % активных минеральных добавок для связывания гидроксида кальция, выделяющегося при гидратации двухкальциевого силиката, производительность по цементу составит

$$Q_{цем} = Q_{цем} \cdot 1,1 = 638604 \cdot 1,1 = 702464 \text{ т/год}$$

Существует ряд заводов в России, работающих по мокрому способу производства, которые более целесообразно перевести на выпуск белитового цемента, чем на сухой способ. Не-

сколько замедленный набор прочности цемента в ранние сроки твердения может быть компенсирован вводом добавки суперпластификатора при размоле цемента, что позволяет существенно снизить количество воды затворения при сохранении подвижности бетонной смеси.

Расчет приблизительного экономического эффекта от внедрения технологии белитового цемента только за счет снижения расхода карбонатного компонента приведен ниже.

#### Исходные данные.

1. Сырье: известняк, глина.
2. Топливо – газ
3. Состав газа, в %:  $CH_4 = 91,4$ ;  $C_2H_6 = 4,1$ ;  $C_3H_8 = 1,9$ ;  $C_4H_{10} = 0,6$ ;  $N_2 = 0,2$ ;  $CO_2 = 0,7$ .
4. Теплота сгорания газа  $35016 \text{ кДж/м}^3$ .

Расход тепла на диссоциацию  $CaCO_3$  ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ) -  $q_1 = 510 \text{ ккал/кг}$ .

Расход тепла на образование расплава –  $50 \text{ ккал/кг}$ .

Потери тепла через корпус печи в окружающую среду –  $141 \text{ ккал/кг}$  [5].

#### Экономия по статьям для белитового цемента.

На 1 тонну клинкера белитового цемента расходуется 988 кг известняка.

$C_2S$  в клинкере  $697 \text{ кг/т}$ .

Массовая доля компонентов  $2CaO \cdot SiO_2$

$$2CaO \cdot SiO_2 = 2 \cdot (40 + 16) + 28 + 2 \cdot 16 = 172.$$

Тогда отношение

$$\frac{CaO}{2CaO \cdot SiO_2} = \frac{56}{172} \cdot 100 = 32,5\%.$$

Для насыщения  $C_2S$  до  $C_3S$  расходуется 56 единиц  $CaO$ , при  $KN=0,92$

$$CaO = 0,92 \cdot 56 = 51,5.$$

Тогда отношение

$$\frac{CaO}{2CaO \cdot SiO_2} = \frac{51,5}{172} \cdot 100 = 30\%.$$

То же касается насыщения  $CA$  до  $C_3A$  и  $C_2F$  до  $C_4AF$ , подробный расчет не приводится.

Поскольку в белитовом цементе отсутствует  $C_3S$ , то расход известняка снижается на 30 % или наблюдается экономия 30 % известняка при производстве белитового цемента; выразим это в кг.

$$0,3CaCO_3 = 988 \cdot 0,3 = 296 \text{ кг}$$

Тогда экономия за счет диссоциации  $CaCO_3$  на 1кг клинкера составит

$$0,296 \cdot q_1 = 0,296 \cdot 510 = 151 \text{ ккал/кг}.$$

Таким образом, суммарная экономия тепла на 1кг клинкера составит

$$\sum q = 151 + 50 + 0,3 \cdot 141 = 243 \text{ ккал/кг.}$$

Выпуск клинкера согласно расчетам 638604 т/год, тогда экономия тепла на годовой выпуск составит

$$q_{\text{эк}} = 638604 \cdot 1000 \cdot 243 = 155.180.772.000 \text{ ккал/год.}$$

Переведем в кДж – 1 ккал = 4,19 кДж, соответственно

$$q_{\text{эк}} = 155.180.772.000 \cdot 4,19 = 650.207.434.680 \text{ кДж/год.}$$

Расход газа сэкономленный при переходе на технологию производства белитового цемента

$$V_{\text{эк.газ}} = \frac{650.207.434.680}{35016} = 18.568.866 \text{ м}^3/\text{год.} = 18.568 \text{ тыс.м}^3/\text{год}$$

Цена газа в Оренбургской области для юридических лиц за 1000 м<sup>3</sup> составляет примерно 5100 рублей, отсюда следует, что годовая экономия предприятия, при переходе на производство белитового цемента только за счет снижения расхода газа составит

$$N_{\text{эк.р}} = 5100 \cdot 18568 = 94.696.000 \text{ руб.} = 94,7 \text{ млн.руб.}$$

Отпускная стоимость цемента с Новотроицкого цементного завода равна примерно 7500 рублей за 1 тонну, предположим, что рентабельность производства составляет 25 %, тогда себестоимость выпуска 1 тонны цемента равна

$$N_{\text{себест.1т}} = 7500 \cdot 0,75 = 5625 \text{ руб.}$$

Тогда затраты на годовое производство цемента

$$N_{\text{себест.год}} = 5625 \cdot 702464,4 = 3.951.362.250 \text{ руб.}$$

Экономия в год только за счет сокращения использования газа, относительно затрат на производство цемента составит

$$V_{\text{эк.газ}} = \frac{94.860.000}{3.951.362.250} \cdot 100 = 2,4 \%$$

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что предлагаемая технология вполне реальна и легко реализуема.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Итоги 2018 года по содержанию и выбросам углекислого газа в атмосфере. <https://uglekislygaz.ru/>.

2. Федоров, А.С. «Клинкер 732» завода «АККЕРМАНН Цемент» // Цемент и его применение. – 2021. – № 2. – С. 11-12.
3. Турчанинов, В. И. Энергоэффективный цемент низкотемпературного обжига [Электронный ресурс] / В. И. Турчанинов, С. А. Дергунов, А. Б. Сатюков // IV Байкальский материаловедческий форум : материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Улан-Удэ, 1-7 июля 2022 г. / отв. ред. Е. Г. Хайкина. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2022. – С. 633-635. – 3 с.
4. Захаров Л.А. // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. 3. – С. 153-154.
5. Проектирование цементных и асбестоцементных заводов / под ред. А.Ф. Семендяева. Издательство литературы по строительству. – М-Л.: Стройиздат, 1966. – 351 с.