

Влияние температуры на кинетику карбонизации извести

Николай Любомирский

Национальная академия природоохранного и курортного строительства
г. Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: pk@napks.edu.ua

Аннотация. Установлены закономерности влияния температуры на кинетику карбонизации известкового камня полусухого прессования при его принудительной карбонизации в условиях повышенной концентрации углекислого газа и изменяемых других технологических факторов и определены основные кинетические параметры карбонизации извести. Максимальная скорость карбонизации достигается в интервале температур 293 – 313 К, с увеличением температуры – скорость реакции карбонизации снижается. Установлено, что для управления скоростью процесса карбонизации нужно обеспечить отвод воды, путем устройства низкотемпературной зоны в карбонизационной камере.

Ключевые слова: строительные материалы, известь, углекислый газ, карбонат кальция, реакция карбонизации, степень карбонизации, водосодержание, температура, давление CO_2 , кинетика, энергия активации.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе общественного развития большое значение приобретает политика сбережения природных ресурсов [1] и снижения уровня загрязнения атмосферы Земли углекислым газом, достигшего на сегодняшний день угрожающих масштабов из-за резкого увеличения количества отходов от производственной деятельности человека.

Главным звеном технико-экономической политики сбережения ресурсов и насыщения рынка строительной продукцией может стать разработка и внедрение экономических материалов и ресурсосберегающих технологий путем создания новых нетрадиционных направлений получения строительных композитов, способных твердеть и приобретать требуемые свойства, например, за счет поглощения углекислого газа. К таким материалам можно отнести строительные материалы и изделия на основе извести.

Научные исследования и практика последних лет убедительно свидетельствуют о том, что эффективным способом направленного управления свойствами искусственных каменных материалов является способ контактного формования начальной структуры с помощью полусухого прессования.

Решить проблему медленной карбонизации извести в обычных условиях, обусловленных низкой концентрацией CO_2 в атмосфере, можно за счет принудительной карбонизацией ее углекислым газом, образующимся в процессе обжига извести. Принцип вторичного использования углекислого газа от обжига известняков позволит создать замкнутую ресурсосберегающую технологию производства карбонизированных изделий на основе извести, работающий в автономном режиме без дополнительных энергетических и ресурсных затрат.

На сегодняшний день вопросы получения материалов полусухого прессования на основе извести карбонизационного твердения не имеют научного обоснования, отсутствуют системные исследования влияния различных технологических факторов на процесс карбонизации известкового вяжущего.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Известь относится к группе вяжущих веществ, твердеющих на основе физических явлений, кристаллизация которых происходит вследствие испарения воды затворения и лишь позже в процессе твердения принимает участие и карбонизация [2]. Реакция насыщения углекислотой известковых растворов – довольно сложный механизм, состоящий из диффузии углекислого газа через пористую структуру и его растворение в воде капиллярных пор, взаимодействия с раствором гидроксида кальция, в результате чего выделяются кристаллы карбоната кальция.

Многими учеными периода карбонизационного твердения известковых вяжущих отводилась второстепенная роль, главным образом, из-за длительного времени перехода извести в карбонат кальция в естественных условиях. Тем не менее, реакция насыщения углекислотой гидроксида кальция в растворах крайне важна с технической точки зрения, поскольку это реакция, в зависимости от связующего состава, улучшает механические свойства и, следовательно, структуру материала.

Анализ научных работ многих ученых [3 – 11] и собственных исследований [12 – 17] позволили заключить, что протекание химической реакции карбонизации извести зависит от множества технологических факторов: влажности и водосодержания известкового теста, температуры карбонизации, концентрации и давления углекислого газа, дисперсности частиц извести, времени карбонизации и т.д. Некоторые ученые, изучая кинетику карбонизации извести [18, 19], пришли к выводам, что для ускорения процесса карбонизации необходима некоторая подсушка изделий. Однако, влияние повышенной температуры на процесс принудительной карбонизации известкового вяжущего не изучен.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Целью настоящей статьи является установление закономерностей влияния температуры на карбонизацию известкового вяжущего при его принудительной карбонизации в условиях повышенной концентрации углекислого газа и изменяемых других технологических факторов.

Поставленная цель была реализована путем проведения исследований кинетики карбонизации известковых образцов полусухого прессования в зависимости от их начального водосодержания, давления и температуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Кинетику карбонизации известковых образцов изучали по специально разработанной методике статическим методом в замкнутой системе (рис. 1).

Принцип работы установки основан на регистрации изменения массы известковых образцов при взаимодействии его с углекислым газом при заданных давлении CO_2 и температуре. Повышенное давление создается путем регулирования редуктора на баллоне с CO_2 . Пониженное давление создается с помощью вакуум-насоса. Установленное давление в реакторе (камере карбонизации) поддерживается с помощью следящего мановакуумметра, который при изменении давления в камере подает соответствующий сигнал, в случае поддержания повышенных давлений на открытие электрического клапана, а в случае проведения опыта в условиях разрежения на запуск вакуум-насоса. Реакционная камера имеет водяную рубашку для поддержания в ней требуемой температуры опыта. Буферная емкость также имеет водяную рубашку и предназначена для конденсации в ней водяного пара при просасывании сквозь реактор CO_2 . Таким

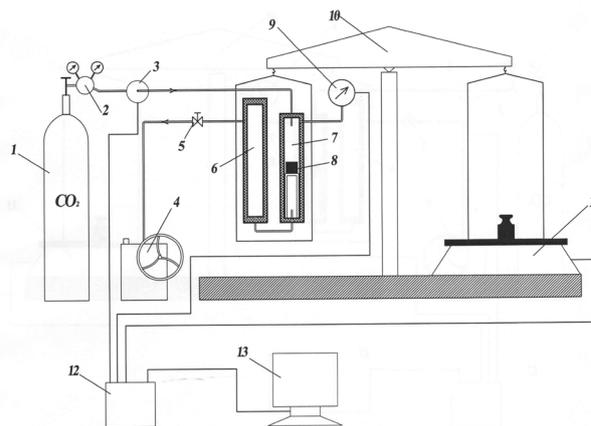


Рис. 1. Схема установки для изучения кинетики карбонизации извести:

1 – газовый баллон с CO_2 ; 2 – редуктор; 3 – электрический клапан; 4 – вакуумный насос; 5 – кран; 6 – буферная емкость; 7 – реактор; 8 – опытный образец; 9 – следящий мановакуумметр; 10 – плечевые весы; 11 – электронные весы; 12 – блок управления; 13 – компьютер

Fig. 1. Installation scheme for studying the kinetics of carbonation of lime:

1 – gas cylinder with CO_2 ; 2 – reducer; 3 – electric valve; 4 – vacuum pump; 5 – the valve; 6 – buffer tank; 7 – reactor; 8 – a prototype; 9 – witness pressure and vacuum gauge; 10 – shoulder scales; 11 – electronic scales; 12 – control unit; 13 – computer

образом, система является замкнутой. Регистрация изменения массы системы осуществляется по сигналам электронных весов специально разработанной компьютерной программой, которая строит соответствующие графики кинетики карбонизации известкового теста.

Степень превращения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 , или степень карбонизации извести определяли по отношению массы гидроксида кальция к теоретическому приросту массы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в процессе перехода его в CaCO_3 согласно химическому уравнению реакции:



по формуле:

$$\alpha = \frac{m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} + \Delta m}{1,351 \cdot m_{\text{Ca}(\text{OH})_2}} \times 100 \%, \quad (2)$$

где:

$m_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ – масса $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в образце, г;

Δm – приращение массы системы в любой момент времени карбонизации, г;

1,351 – коэффициент, учитывающий изменение массы системы при 100 % превращении $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 .

Опыты проводили на известковых образцах-цилиндрах полусухого прессования диаметром 30 мм. Для установления массы и формовочного давления прессования образцов, при которых можно свести к минимуму погрешности проведения испытаний от данных факторов, были проведены предварительные опыты, в результате которых было установлено, что наибольшая

схожесть результатов наблюдается на образцах массой 20 г, полученных прессованием с усилием 10 МПа.

Кинетику карбонизации образцов изучали в среде 100 % концентрации углекислого газа при температуре 293 – 333 К в условиях разрежения и избыточных давлений в интервале давлений CO_2 от 0,02 МПа до 0,2 МПа и различном начальном водосодержании известкового вяжущего, изменяемым в пределах от 1 до 25 % мас. Варьируемые факторы были выбраны с учетом теоретических исследований процесса принудительной карбонизации извести [13, 14, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Влияние температуры при фиксированных давлении CO_2 и водосодержании известковых образцов (1, 5,

10 % мас.) показано на рис. 2. Оно обнаруживает себя в нетривиальной форме, что особенно наглядно проявляется при повышении давления.

В интервале температур 293 – 313 К скорость карбонизации и уровень превращения быстро увеличиваются. Однако с повышением температуры до 333 К влияние температуры выражено слабее. Очевидно, что с повышением температуры возникают условия для разложения извести и активного удаления воды из образца в холодную часть системы, а снижение количества воды в реакционной зоне снижает скорость взаимодействия CO_2 с $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

С повышением давления CO_2 влияние температуры на процесс карбонизации выражается слабее, кривые степени превращения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 при температурах 293 – 313 К и 333 К на начальных этапах начинают совпадать, причем с увеличением давления этот период

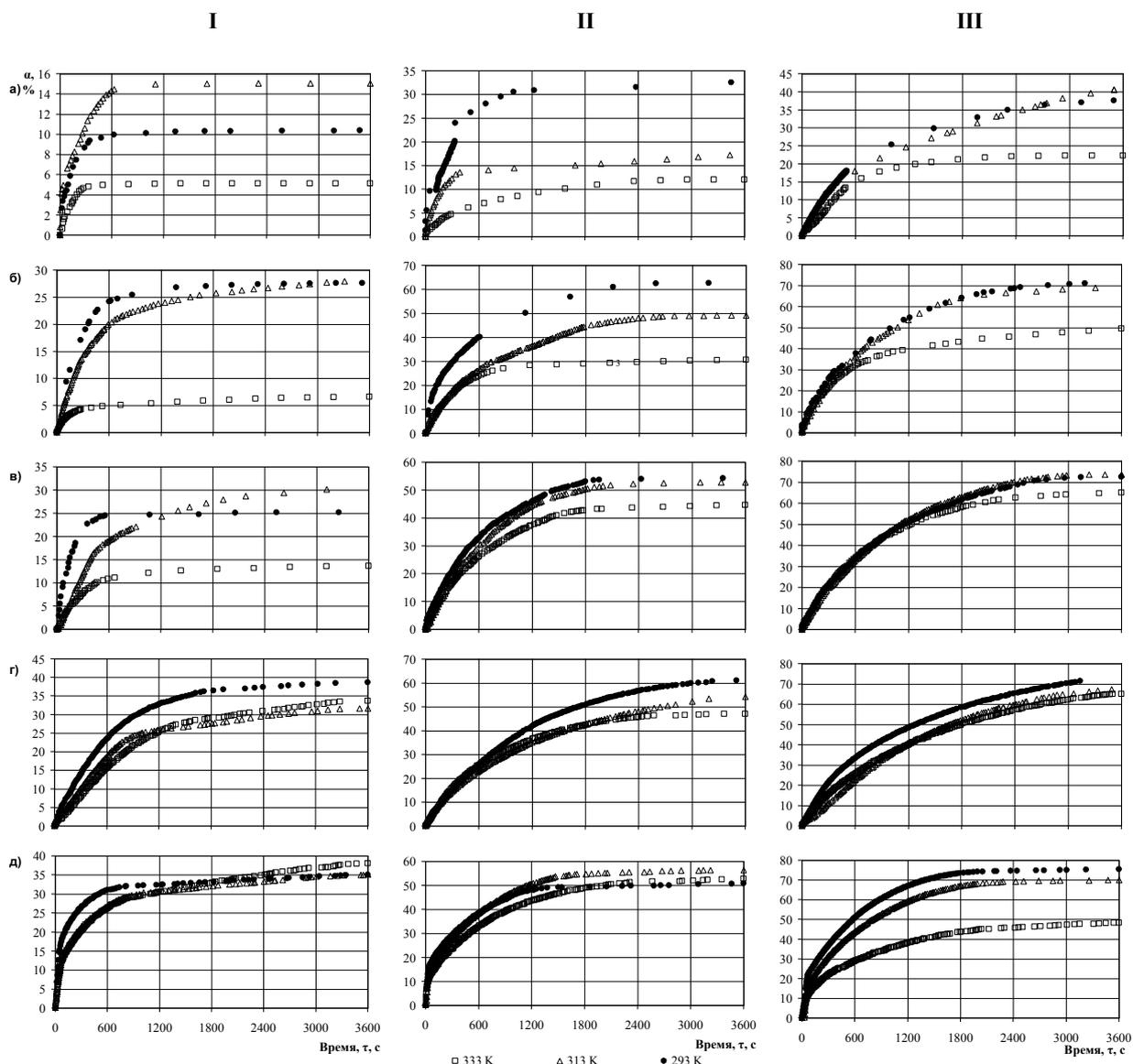


Рис. 2. Влияние температуры на кинетику карбонизации известковых образцов в зависимости от водосодержания, % мас.: I – 1; II – 5; III – 10 и давления углекислого газа, МПа: а) – 0,02; б) – 0,05; в) – 0,08; г) – 0,1; д) – 0,2.

Fig. 2. Influence of temperature on the kinetics of carbonization lime samples, depending on the water contents, % wt.: I – 1; II – 5; III – 10 and pressure of carbon dioxide, MPa: а) – 0,02; б) – 0,05; в) – 0,08; г) – 0,1; д) – 0,2.

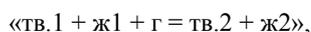
увеличивается. Так, если у образцов с начальным водосодержанием 10 % мас. при 0,02 МПа этот период отсутствует, то при давлении 0,05 и 0,08 МПа он составляет 400 с и 1000 с соответственно, а при давлении 0,1 МПа кинетические кривые степени карбонизации практически совпадают во всем исследуемом интервале времени (3600 с). При увеличении давления выше атмосферного влияние температуры более заметно.

Значительней всего влияние температуры на увеличение степени превращения наблюдается при низких давлениях в интервале 0,02 – 0,05 МПа, а при повышении давления до 0,08 МПа и выше влияние температуры карбонизации на изменение показателя α мало заметно.

Существенным фактором на величину степени карбонизации извести является начальное водосодержание известковых образцов. С увеличением количества воды затворения гашеной извести от 1 до 10 % мас. показатели степени превращения гидроксида в карбонат кальция возрастают в 2 – 3 раза в зависимости от других исследуемых изменяемых факторов.

В целом, повышение температуры снижает значения степени карбонизации извести. Исходя из полученных опытных данных, наиболее оптимальным температурным интервалом карбонизации известковых образцов полусухого прессования является 293 – 313 К. С повышением температуры неизменно наблюдается снижение показателей α .

Карбонизация гидроксида кальция относится к гетерогенным превращениям типа:



где:

«тв.1» – гидроксид кальция; «тв.2» – карбонат кальция; «ж1» – вода; «ж2» – насыщенный раствор карбоната кальция, гидрокарбоната кальция и гидроксида кальция в воде.

Слой воды, а точнее слой жидкой фазы, являющийся насыщенным водным раствором карбоната и гидроксида кальция можно рассматривать как барьерное, но проницаемое препятствие на поверхности карбонизируемых кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Для выбора кинетической модели процесса выделим наиболее существенные особенности получаемого превращения:

- 1) рассматриваемая реакция не сопровождается образованием барьерного слоя продукта реакции, присутствие которого тормозило бы развитие процесса;
- 2) вид кинетических кривых дает основание отнести процесс либо к реакциям, кинетика которых подчиняется закономерностям, характерным для мгновенного вступления в реакцию всей поверхности с последующим сокращением объема твердого реагента, либо к топохимическим превращениям.

Основываясь на данных особенностях, при обработке кинетических кривых были использованы три кинетических уравнения [21, 22]:

– уравнение Аврами и Ерофеева:

$$-\ln(1-\alpha) = kt^r, \quad (3)$$

– уравнение сокращающегося объема:

$$1-(1-\alpha^{1/3}) = k_1 t; \quad (4)$$

– уравнение сокращающейся площади:

$$1-(1-\alpha^{1/2}) = k_2 t, \quad (5)$$

где:

α – степень превращения в момент времени t ;

k , k_1 и k_2 – кажущиеся константы скорости, соответственно, для моделей Аврами – Ерофеева, сокращающегося объема и сокращающейся площади;

$r = n + 3$, где n – показатель степени при времени в уравнении Аврами и Ерофеева.

Эти уравнения справедливы для процессов, не сопровождающихся образованием барьерного слоя твердого продукта реакции. Отличие их друг от друга состоит в том, что в случае сжимающегося объема и площади предполагают, что в реакцию мгновенно вступает вся поверхность твердого реагента. В противоположность этому, уравнение Аврами и Ерофеева чаще применяют к так называемым сигмоидным процессам, т.е. к таким, которые начинаются в некоторых локальных зонах, обладающих повышенной реакционной способностью. Однако уравнение Аврами и Ерофеева вполне удовлетворительно описывает также реакции, которые начинаются сразу на всей поверхности твердого образца.

Обработка первичного массива опытных данных показала, что несколько лучшее согласие с результатами измерений дает уравнение Аврами – Ерофеева, для которого коэффициент корреляции составил 0,9977.

Взаимодействие гидроксида кальция с диоксидом углерода является процессом, развитие которого при повышенных температурах может быть осложнено дегидратацией кристаллогидрата гидроксида кальция, который будет образовываться при затворении гашеной извести водой. Это означает, что при повышенных температурах при наличии температурного градиента одновременно с карбонизацией гидрата гидроксида кальция будет происходить его дегидратация, сопровождающаяся переносом водяного пара в холодную часть системы.

Исследование влияние температуры на скорость карбонизации известкового вяжущего показало, что при заданных значениях начального водосодержания и давления скорость реакции слабо зависит от температуры, что может означать близость к нулю кажущейся энергии активации процесса. Это вполне объяснимо, поскольку известно, что реакции нейтрализации, к которым может быть отнесено превращение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 , протекают как безактивационные процессы, скорость реакции которых лимитируется только транспортом реагентов к зоне взаимодействия.

В табл. 1 представлены константы уравнения Аврами – Ерофеева принудительной карбонизации известковых образцов полусухого прессования. При близких значениях констант скоростей реакции в целом, изменение их подчинено некоторой закономерности: константа скорости в уравнении Аврами – Ерофеева возрастает

Таблица 1. Константы уравнения Аврами – Ерофеева и коэффициент корреляции карбонизации известковых образцов полусухого прессования в зависимости от температуры

Table 1. Constants equations Avrami – Yerofeev's theory and the correlation coefficient carbonization lime samples dry pressing depending on temperature

$$\ln[-\ln(1-\alpha)] = \ln(k_E) + \gamma \ln(\tau) = B^* + A^* \cdot \ln(\tau)$$

Водо-содержание, % мас.	Давление CO ₂ , МПа	Температура, К	A*	B*	Коэффициент корреляции R ²
1	0,02	293	0,4739	-5,0863	0,9901
		313	0,4122	-4,4981	0,9627
		333	0,5075	-5,9481	0,9411
	0,05	293	0,6635	-5,4171	0,9981
		313	0,7981	-6,4805	0,9940
		333	0,7681	-7,2288	0,9515
	0,08	293	0,796	-5,8099	0,978
		313	1,2357	-9,1665	0,9739
		333	1,0292	-8,3339	0,9617
	0,1	293	0,8705	-6,8739	0,996
		313	0,8791	-7,2273	0,9942
		333	0,9688	-8,0209	0,9904
0,2	293	0,3882	-3,3948	0,9485	
	313	0,8737	-5,7286	0,9918	
	333	0,6348	-5,0547	0,9103	
5	0,02	293	0,4701	-4,3877	0,9535
		313	0,6189	-5,5091	0,9939
		333	0,3035	-4,7896	0,9841
	0,05	293	0,562	-4,2565	0,9921
		313	0,8192	-6,3462	0,9910
		333	0,8791	-6,76425	0,9547
	0,08	293	0,7188	-5,5674	0,9949
		313	1,1993	-8,5100	0,9762
		333	1,0101	-7,4797	0,9817
	0,1	293	0,8159	-6,4675	0,9959
		313	0,9160	-7,0632	0,9847
		333	1,0156	-7,5906	0,9923
0,2	293	0,4905	-3,8209	0,9188	
	313	1,4524	-7,2905	0,9839	
	333	0,4596	-3,9069	0,9894	
10	0,02	293	0,9398	-7,3604	0,9937
		313	0,8868	-7,0447	0,9947
		333	0,9946	-8,1520	0,9897
	0,05	293	0,7181	-5,3276	0,9934
		313	0,8940	-6,4709	0,9975
		333	0,7598	-5,7411	0,9953
	0,08	293	0,7435	-5,6533	0,9868
		313	0,9434	-9,9403	0,9990
		333	0,8631	-6,3797	0,9970
	0,1	293	0,9151	-6,6895	0,9977
		313	0,9773	-7,1113	0,9953
		333	0,9587	-7,2756	0,9941
0,2	293	0,6569	-4,4956	0,9329	
	313	1,0374	-7,1050	0,9537	
	333	0,6413	-5,0483	0,9444	

при повышении температуры с 293 до 313 К, а затем, при температуре 333 К, – снижается. Это явление более ярко проявляется при карбонизации известкового вяжущего в условиях разрежения и водосодержания извести больше 1 % мас. или при избыточном давлении CO₂. Причем разница в значениях константы скорости при повышении температуры с 313 до 333 К с увеличением давления с 0,02 до 0,08 МПа уменьшается, а при атмосферном давлении (0,1 МПа) – становится более значительной с увеличением начального водосодержания системы.

Оценку кажущейся энергии активации осуществляли с использованием традиционного приема, который заключается в определении температурной зависимости максимальной скорости процесса [21, 23]. При мгновенном вступлении в реакцию всей поверхности максимальная скорость отвечает тангенсу угла наклона кривых $\alpha = f(\tau)$ на начальной стадии.

Из данных табл. 1 видно, что показатель степени при времени в уравнении Аврами – Ерофеева при давлениях, близких к атмосферному (0,08 – 0,1 МПа), во-первых, близок к единице и, во-вторых, слабо зависит от температуры. Это позволяет прийти к заключению, что кажущаяся энергия активации процесса в области атмосферного давления CO₂ близка нулю.

Действительно, если представить уравнение Аврами – Ерофеева в виде:

$$\alpha = 1 - \exp(-k_E \tau^\gamma), \quad (6)$$

то при $\gamma = 1$ оно приобретает вид:

$$\alpha = 1 - \exp(-k_E \tau). \quad (7)$$

Дифференцируя его по времени дает выражение для величины $\frac{d\alpha}{dt}$:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_E - \exp(-k_E \tau), \quad (8)$$

и, следовательно, максимальная скорость процесса (при $\tau = 0$) равна константе k_E . Поскольку при давлениях 80 – 100 кПа эта константа не зависит от температуры, то:

$$\frac{d(\frac{d\alpha}{dt})}{dT} = \frac{d \ln k_E}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} = 0, \quad (9)$$

т.е., кажущаяся энергия активации равна нулю.

Для более низких давлений разрежения и избыточных давлений выше атмосферного величина кажущейся энергии активации была найдена по наклону кинетической кривой на начальной стадии процесса. В качестве примера рис. 3 приведены фрагменты кинетической кривой карбонизации известкового вяжущего с начальным водосодержанием 10 % мас., характеризующей развитие процесса в течение 60 с при различных температурах и давлениях (в условиях разрежения, атмосферном и избыточном давлении). На рис. 4 представлены зависимости логарифма скорости от обратной температуры для различных значений давления углекислого

го газа от начального водосодержания известкового вяжущего.

Как видно, скорость реакции уменьшается с повышением температуры, т.е., величина кажущейся энергии активации будет отрицательной. Можно полагать, что в рассматриваемом случае скорость процесса зависит только от доставки CO_2 к поверхности $\text{Ca}(\text{OH})_2$, не защищенной присутствием барьерного слоя. При повышении температуры процесс доставки CO_2 может осложняться за счет преодоления дополнительного препятствия в виде повышающегося с ростом температуры давления водяного пара.

Соответствующие данные констант скорости реакции начальной стадии карбонизации в течение 300 с при температуре 293 и 333 К и расчетные значения кажущейся энергии активации приведены в табл. 2.

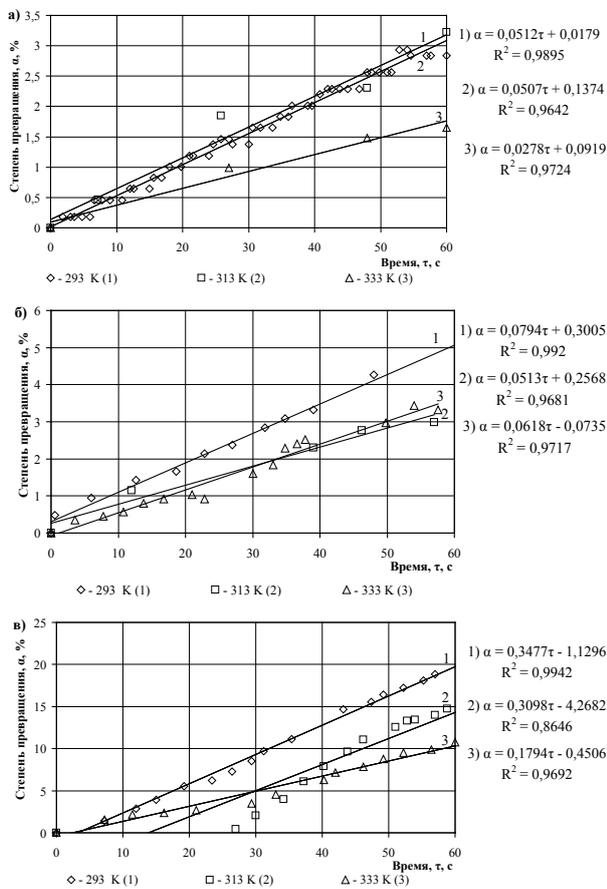


Рис. 3. Начальные участки кинетических кривых, характеризующих развитие процесса при различных температурах и давлении, МПа: а) – 0,02; б) – 0,1; в) – 0,2

Fig. 3. The initial sites of kinetic curves characterizing the development process at various temperatures and pressure, МПа: а) – 0,02; б) – 0,1; в) – 0,2

Как видно из табл. 2, значения кажущейся энергии активации малы и с отрицательным знаком, что свидетельствует о высокой реакционной способности известкового вяжущего к CO_2 и подтверждает, что лимитирующим фактором скорости процесса является диффузия CO_2 к зернам $\text{Ca}(\text{OH})_2$. С увеличением водосодержания и давления значения E_a уменьшаются.

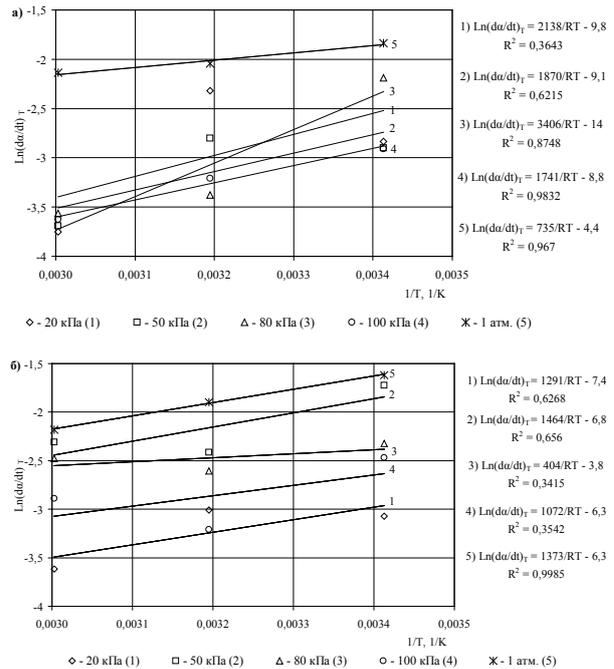


Рис. 4. Температурная зависимость скорости карбонизации известкового вяжущего с водосодержанием 1 % мас. (а) и 10 % мас. (б) при различных давлениях углекислого газа

Fig. 4. Temperature dependence of the speed of carbonization lime binder with content of water 1 % wt. (а) and 10 % wt. (б) at various pressures of carbon dioxide

Обобщая экспериментальные данные и результаты их обработки процесс карбонизации известкового вяжущего от температуры можно представить следующим образом:

- при нормальных температурах (293 К) карбонизация проходит с небольшой скоростью, поскольку развитие процесса блокирует барьерный слой жидкой воды, точнее насыщенного водного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и CaCO_3 , образующегося на поверхности кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- при температурах близких 313 К создаются условия для дегидратации и удаления воды в холодную зону системы: чем выше температура, тем быстрее проходит этот процесс и тем больше становится скорость процесса;
- при температурах выше 323 К дегидратация перестает быть лимитирующей стадией процесса, растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CO_2 снижается и кинетика карбонизации известки подчиняется установленным закономерностям, выражающимся в снижении скорости при повышении температуры.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что кинетика принудительной карбонизации гидроксида кальция описывается уравнению Аврами – Ерофеева, коэффициенты которого различны в зависимости от условий карбонизации и отвечает случаю мгновенного вступления в реакцию всей поверхности реагента без образования барьерного слоя продукта реакции в начальный период.

Таблица 2. Константы скорости и расчетные значения кажущейся энергии активации карбонизации известкового вяжущего в первые 300 с**Table 2.** The rate constant and calculated values of apparent energy of the activation of carbonization lime binder in the first 300 s

$$E_a = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \quad [24]$$

Давление CO ₂ , МПа	Начальное водосодержание известковых образцов, % мас.	Константы скорости реакции при температуре, (dα/dt) _T		Кажущаяся энергия активации E _a , кДж/моль
		293 К, K ₁	333 К, K ₂	
0,02	1	0,03052	0,01716	-11,68
	5	0,0618	0,0165	-26,81
	10	0,0410	0,0280	-7,60
0,05	1	0,0619	0,0155	-28,14
	5	0,0992	0,0554	-11,83
	10	0,0850	0,0715	-3,50
0,08	1	0,0855	0,0261	-24,05
	5	0,0689	0,0554	-4,41
	10	0,0718	0,0689	-0,82
0,1	1	0,0466	0,0260	-11,85
	5	0,0495	0,0531	1,43
	10	0,0704	0,0524	-5,98
0,2	1	0,0880	0,0677	-5,31
	5	0,0973	0,0803	-3,89
	10	0,1223	0,0741	-10,16

- Важнейшим фактором, влияющим на степень карбонизации извести, является его начальное водосодержание системы. Увеличение водосодержания известковых образцов полусухого прессования с 1 до 10 % мас. приводит к увеличению показателя степени превращения гидроксида в карбонат кальция в 2 – 3 раза в зависимости от температуры и давления углекислого газа.
- Доказано, что такие технологические факторы как температура и давление CO₂ не оказывают определяющего влияния на показатель степени карбонизации извести при постоянном значении одного из факторов, но являются важными взаимно дополняющими друг друга параметрами, регулирующими скорость превращения Ca(OH)₂ в CaCO₃.
- Определено, что максимальная скорость карбонизации достигается в интервале температур 293 – 313 К, лимитирующим фактором при этом является либо растворение с последующей диффузией CO₂ к поверхности твердого реагента, либо растворение Ca(OH)₂ и диффузией гидроксильного иона к поверхности контакта с газовой фазой, при увеличении температуры (свыше 313 К) – скорость реакции карбонизации снижается. Установлено, что для управления скоростью процесса карбонизации нужно обеспечить отвод воды, путем устройства низкотемпературной зоны в карбонизационной камере.
- and power industry in agriculture. – Lublin. – Vol. X. – 333 – 339.
- Сычев М.М., 1970.** Систематизация вяжущих веществ / Сычев М.М. // Журнал прикладной химии. – № 3. – 528 – 533.
- Зацепин К.С., 1952.** Известковые карбонизированные строительные материалы / Зацепин К.С. // Сборн. материалов Московского науч.-технич. совещания по жил.-гражд. строит., строит. материалам и проектно-изыскат. работам. Т. 2. – М: Московская правда. – 283 – 290.
- Михайлов Н.Н., 1960.** Искусственная карбонизация как способ повышения активности доломитового вяжущего / Михайлов Н.Н., Кузнецов А.М. // Строительные материалы. – № 9. – 28 – 30.
- Воробьев А.А., 1971.** Влияние карбонизации на физико-механические свойства автоклавного газобетона с тонкомолотыми карбонатными добавками / Воробьев А.А. // Строительные материалы. – №2. – 32 – 33.
- Zalmanoff N., 1956.** Carbonation of Lime Putties To Produce High Grade Building / N. Zalmanoff // Rock Products. – August. – 182 – 186.
- Zalmanoff N., 1956.** Carbonation of Lime Putties To Produce High Grade Building / N. Zalmanoff // Rock Products. – September. – 84 – 90.
- Matsuda O., 1973.** Experimental study of the manufacture of building materials by carbonation of slaked lime / Matsuda O., Yamada H. // Sekko to sekkai = Gypsum & Lime. – № 125. – 8 – 17.
- Aono T., 1931.** Studies on the reactions between gas and solid, part II: absorption of CO₂ by CaO and Ca(OH)₂ / Aono T. // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – № 6. – 319 – 324.

ЛИТЕРАТУРА

- Saliev E., 2008.** Ecological and economic problems of the introduction of power-saving technologies in Ukraine / Saliev E. // ТЕКА. Commission of motorization

10. **Cizer O., 2011.** Crystal morphology of precipitated calcite crystallized calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders. [Электронный ресурс] / Cizer O., K. Van Balen, D. Van Gemert // Forum italiano calce. – <http://www.iscowa.org/>
11. **Cultrone G., 2005.** Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural / Cultrone G., Sebastián E., Ortega Huertas M. // Cement and Concrete Research Volume 16. – Issue 12. – 278 – 289.
12. **Любомирский Н.В., 2009.** Формирование структуры известкового теста при твердении в среде углекислого газа / Любомирский Н.В., Локтионова Т.А. // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Simferopol-Lublin. – Vol. 11A. – 239 – 246.
13. **Любомирский Н.В., 2010.** Термодинамическое обоснование искусственной карбонизации известки / Любомирский Н.В. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс. – вип. № 38. – 426 – 430.
14. **Любомирский Н.В., 2010.** Особенности карбонизации известковых вяжущих материалов / Любомирский Н.В. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка: ДонНАБА. – Вип. 2010-5(85). – 121 – 126.
15. **Любомирский Н.В., 2011.** Влияние качества известки и концентрации углекислого газа на физико-механические свойства искусственно карбонизированного камня / Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Бахтина Т.А., Джелил А.Э. // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Vol. 13C. – 173 – 182.
16. **Lyubomirsky N., 2012.** The resource saving technology for obtaining facing artificially carbonated products and economic efficiency of their production / [N. Lyubomirsky, T. Bakhtina, A. Bakhtin, D. Vorobiev, A. Jalyal] // Energy-saving and Ecological Materials, Installations and Technology in Construction. – Biala Podlaska: Wydawnictwo PSW JPII. – 115 – 122.
17. **Любомирский Н.В., 2013.** Формирование прочностных свойств материалов на основе известково-известняковых композиций карбонизационного типа твердения / Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Джелил А.Э. // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin – Pzeszow. – Vol. 15, № 5. – 23 – 30.
18. **Розенфельд Л.М., 1955.** Исследования пенокарбоната / Розенфельд Л.М. – М.: Госстройиздат. – 52.
19. **Силаенков Е.С., 1961.** Влияние карбонизации на некоторые свойства автоклавных бетонов / Силаенков Е.С., Тихомиров Г.В. // Строительные материалы. – №4. – 30 – 33.
20. **Любомирский Н.В., 2011.** Современное состояние исследований искусственной карбонизации известковых систем / Любомирский Н.В., Воробьев Д.М. // Motrol. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Vol. 13C. – 165 – 172.
21. **Стромберг А.Г., 2001.** Физическая химия / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – М.: Высшая школа. – 527.
22. **Эммануэль Н.М., 1984.** Курс химической кинетики / Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. – М.: Высшая школа. – 463.
23. **Дельмон Б., 1972.** Кинетика гетерогенных реакций / Дельмон Б. – М.: Мир. – 553.
24. **Кузнецова Т.В., 1989.** Физическая химия вяжущих материалов / Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. – М.: Высш. школа. – 384.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE KINETICS OF CARBONATION OF LIME

Summary. The regularities of influence of temperature on the kinetics of carbonization of limestone dry pressing at his forced carbonization in conditions of high concentration of carbon dioxide and other modifiable technological factors and determined the main kinetic parameters of carbonation of lime. Maximum speed carbonization is in the range of temperatures 293 – 313 K with increasing temperature – speed carbonation reaction is reduced. It is established that for the speed control of the process of carbonization need to ensure drainage of water by the device of low-temperature zone in carbonization camera.

Key words: building materials, lime, carbon dioxide, calcium carbonate reaction carbonization, the degree of carbonization, water content, temperature, pressure CO₂, kinetics, activation energy.