

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ДЫМОВЫХ ТРУБ

И. П. Павлова¹, Н. В. Левчук², В. С. Андрейук³

¹ К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь, pavlinna@tut.by

² К. т. н., доцент, доцент кафедры инженерной экологии и химии УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

³ Ст. преподаватель кафедры технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

Реферат

Решение проблемы обеспечения безопасной эксплуатации ряда производственных объектов связано со своевременным проведением диагностического обследования их технического состояния. На ряде предприятий в непрерывный процесс производства, являясь его важнейшей частью, включены дымовые трубы, являющиеся важнейшей частью процесса.

Дымовые трубы работают в сложных условиях и испытывают значительные статические и динамические нагрузки, воздействие уходящих газов, что приводит к повреждению материалов труб, изменению положения их элементов в пространстве, нарушению их целостности, возникновению трещин и других дефектов, и, как следствие, к повышению их аварийности при эксплуатации. При этом, как показывает практика, в настоящий момент большинство дымовых труб выработали свой проектный ресурс (50 лет).

Для предупреждения аварий проводится экспертиза промышленной безопасности, предусматривающая диагностику дымовых труб. Диагностика труб осуществляется с применением комплекса методов, включающим исследование степени карбонизационных повреждений. Наиболее информативным способом определения степени карбонизации бетона является определение содержания углекислого газа в образцах бетона методом их растворения в концентрированной серной кислоте. В данной работе определена степень карбонизации бетона трубы на разных высотных отметках с анализом возможных причин, усугубляющих карбонизационные процессы и деградацию железобетона.

Ключевые слова: степень карбонизации; бетонная дымовая труба; деградация железобетона; влияние наружного воздуха.

OUTDOOR AIR INFLUENCE ON THE CARBONIZATION OF THE CONCRETE OF SMOKESTACK

I. P. Pavlova, N. V. Levchuk, V. S. Andreiuk

Abstract

The solution to the problem of ensuring the safe use of a number of production facilities is associated with the timely conduct of a diagnostic examination of their technical conditions. At a number of enterprises, smokestacks are included in the continuous production process, as its most important part.

Smoke pipes work in difficult conditions and leads significant static and dynamic loads, the effect of flue gases, which leads to damage to the pipe materials, a change in the position of their elements in space, a violation of their integrity, the occurrence of cracks and other defects, and, as a result, increase their accident rate during operation. Moreover, as practice shows, at present most smokestacks have exhausted their design life (50 years).

To prevent accidents, an industrial safety review is being carried out, including the diagnosis of smokestacks. Pipe diagnostics is carried out using a set of methods, including the study of the carbonization damage degree. The most informative way to determine the degree of carbonization of concrete is to determine the carbon dioxide content in concrete samples by dissolving them in concentrated sulfuric acid. In this paper are determined the degree of carbonization of concrete pipes at different elevations with an analysis of possible causes that exacerbate carbonization processes and degradation of reinforced concrete.

Keywords: degree of the carbonization; concrete smokestack; degradation of reinforced concrete; outdoor air influence.

Введение

Уходящие в небо дымовые трубы – неотъемлемая часть привычного урбанистического пейзажа.

Дымовая труба является ответственным инженерным сооружением, работающим в чрезвычайно тяжелых условиях высоких ветровых нагрузок, температуры и агрессивного воздействия дымовых газов. Учитывая, что средний возраст дымовых труб приближается к 50 годам, следует уделять безопасности труб самое пристальное внимание. Дымовые трубы большой высоты, как и другие высотные сооружения, находятся под непрерывным действием высокотемпературных агрессивных газовых потоков и внешних природных факторов, снижающих расчётный срок службы дымовых труб.

За последние годы резкое увеличение транспортных выбросов, а также аккумуляция загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, выбрасываемых в окружающую среду стационарными источниками выбросов (трубами), привели к усилению агрессивного воздействия внешней среды на строительные сооружения в целом. Одним из способов решения экологических проблем, связанных с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух, является увеличение высоты труб. Высота труб обуславливает концентрации кислотных оксидов и других вредных веществ, накапливающихся как в приземном слое атмосферы, так и на различных высотных отметках. Максималь-

ные концентрации газообразных веществ создаются на некоторых расчетных расстояниях от источника выброса в зависимости от условий рассеивания (таких как ветер, атмосферная влажность, осадки), а также видового состава выброса, при этом характер внешней среды (рН), в которых эксплуатируется сооружение, изменчив.

Колоссальное количество дымовых труб используется во многих отраслях промышленности. Они предназначены как для создания тяги, так и для отвода в верхние слои атмосферы и последующего рассеивания вредных газов и газозооных смесей. Для отвода продуктов сгорания и обеспечения естественной тяги в топливных агрегатах промышленные предприятия оборудуют дымовыми трубами, которые препятствуют появлению сажи и угарных газов внутри помещений. Конструкции промышленных труб и материалы их изготовления могут быть разными, но для беспрепятственного прохождения вредных выбросов все они должны иметь гладкие и ровные поверхности внутренних стенок.

Промышленные трубы по материалу и конструктивным особенностям классифицированы: кирпичные; монолитные железобетонные; сборные железобетонные; металлические отдельно стоящие трубы и на растяжках; комбинированные (по типу труба в трубе) и вытяжные башни. К наиболее распространенным типам промышленных труб относятся [1]:



Рисунок 1 – Дegradaция железобетонных конструкций [2]

Таблица 1 – Характерные дефекты промышленных труб

Конструктивные элементы трубы, наиболее подверженные повреждению при длительном отключении	Характерные повреждения трубы
1. Железобетонные монолитные трубы 1.1. Ствол	Карбонизация бетона от воздействия внешней среды, коррозия арматуры вследствие карбонизации Раскрытие вертикальных трещин в бетоне по ходу арматурных стержней при их коррозии, отслоение и обрушение защитного слоя бетона Повреждение оголовка трубы с обрушением чугунных звеньев колпака из-за «роста» футеровки вследствие кристаллизации накопленных сульфатов при переменной влажности кладки Сернокислотная коррозия бетона ствола Глубокое разрушение, вплоть до образования сквозных отверстий в бетоне ствола ниже оголовка трубы
1.2. Футеровка	Размораживание бетона в неплотных швах бетонирования Разрушение консолей внутри ствола из-за сернокислотной коррозии бетона Обрушение футеровки из-за снижения прочности раствора кладки от сернокислотной коррозии Образование кольцевых и локальных выпучин вследствие сульфатации раствора кирпичной кладки под воздействием атмосферной влаги, вплоть до потери устойчивости звеньев футеровки
1.3. Теплоизоляция	Потеря защитных качеств минераловатной теплоизоляции из-за разрушения волокнистой структуры материала Обрушение фрагментов кладки футеровки
1.4. Фундамент	Нарушение отмоксти, сопровождающееся локальным обводнением основания, креном трубы из-за снижения несущей способности основания
1.5. Металлоконструкции лестницы, световых площадок, молниезащиты	Потеря защитных качеств антикоррозионного покрытия, коррозия металлоконструкций из-за несвоевременного восстановления покрытий. Недопустимый износ металлоконструкций

а) железобетонные дымовые трубы:

- с футеровкой из глиняного кирпича, с частичной теплоизоляцией и воздушным неветилируемым зазором;
- с футеровкой из глиняного кирпича, теплоизоляцией из минераловатных матов или полужестких плит, прижимной стенкой;
- с футеровкой из кислотоупорного кирпича, минераловатной теплоизоляцией, прижимной стенкой и неветилируемым зазором;
- с монолитной футеровкой из полимерцементного и полимерсиликатного бетона;
- с вентилируемым зазором между стволом и футеровкой;
- с внутренними металлическими газоотводящими стволами (МТС) и теплоизоляцией наружной поверхности МГС;
- с внутренним стволом из композитных материалов (стеклопластик, стекло-углепластик, стеклофаолит);
- дымовые и вентиляционные сборные железобетонные трубы из специального бетона;

б) кирпичные дымовые трубы:

- с кирпичной футеровкой и теплоизоляцией в нижней части трубы;
- с кирпичной футеровкой по всей высоте ствола и теплоизоляцией нижней части ствола и воздушным неветилируемым зазором;
- с кислотоупорной кирпичной футеровкой и теплоизоляцией по всей высоте трубы.

Разрушение железобетонных конструкций – это временной процесс, включающий ряд химических и физических превращений. Зная различные процессы деградации и влияющие на них факторы (свойства материалов, внешние процессы), можно оценить срок службы для железобетонных конструкций. Карбонизация – наиболее распространенная причина деградации [2]. На рис. 1 представлены основные процессы деградации железобетонных конструкций.

В данной работе основное внимание уделено процессам карбонизации железобетонных труб, как наиболее подверженным этим коррозионным процессам.

При выполнении работ по оценке технического состояния промышленных дымовых труб на различных предприятиях были выявлены характерные дефекты труб (табл. 1) [1].

Кроме этого, необходимо отметить, что к появлению большинства дефектов приводит изменение температурно-влажностных режимов эксплуатации, что характеризуется снижением температуры газов и повышением их влажности. Это связано в первую очередь с ужесточением требований к экономии используемого топлива, а также более глубокой очистке отводимых газов.

Коррозию наружной поверхности дымовых труб вызывают агрессивные компоненты естественной среды: углекислый газ (карбонизация) и хлориды воздуха (хлоридная коррозия); многократно повторяющиеся природные циклы – намокание \ высушивание, замораживание \ оттаивание; перепады температур – день \ ночь; эрозия бетона от воздействия потоков ветра и техногенные факторы – дымовые газы и специфические агрессивные компоненты воздуха промышленных зон и энергетических станций.

Степень воздействия на наружные поверхности трубы зависит от высоты самой трубы и высоты дымовых труб, расположенных рядом. Специфическая внутренняя структура поверхности дымовой трубы (для удаления конденсата) в большей степени защищает ее от коррозии, чем наружные поверхности. Наиболее сильное разрушение бетона вызывают присутствующие в дымовых газах оксиды серы (SO_3) и азота (NO_3).

Даже небольшие концентрации этих оксидов в дымовых газах, оставшиеся после очистки на современных установках по десульфированию (FGTS), приводят к значительным повреждениям.

Наружную поверхность дымовых труб в зависимости от степени агрессивного внешнего воздействия и других опасных факторов делят на несколько зон (рис. 2).

От эксплуатационной надежности дымовых труб во многом зависит бесперебойная работа промышленных предприятий. Одним из основных факторов, снижающих долговечность дымовых труб, безусловно, является карбонизация бетона.

Карбонизация бетона

Начало изучения процессов газовой коррозии бетона и железобетона положено работами Алексева С. А., Розенталя Н. Н. [4], Бабушкина В. И., Москвина В. М. [5], однако проблема до сих пор остается актуальной. Проникновение газов в железобетонные конструкции способствует потере защитных свойств бетона. Глубина проникновения углекислого газа и условия контакта газа с арматурой характеризуют долговечность бетона. Главные факторы, влияющие на протекание газовой коррозии в железобетонных конструкциях, следующие: отсутствие на поверхности арматуры пленки воды, минимальное содержание влаги, высокая температура, неоднородность химического состава арматуры (рис. 3).

Действие на железобетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Агрессивное действие распространенных кислых газов CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств бетоном поверхностного слоя.



Рисунок 2 – Условные «агрессивные» зоны по высоте дымовой трубы [3]

Концентрация углекислого газа на поверхности бетона прямо влияет на глубину фронта проникновения углекислого газа.

Критическая концентрация CO_2 в приарматурной зоне бетона (слой бетона, непосредственно соприкасающийся с поверхностью арматуры) является одним из основных факторов, определяющих длительность пассивного состояния стали. При накоплении CO_2 в

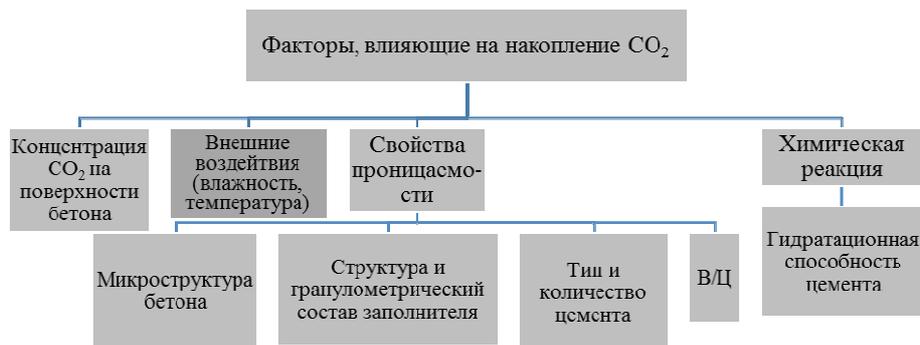


Рисунок 3 – Факторы, влияющие на накопление углекислого газа

количестве, превышающем критическое, наступает переход стали из пассивного состояния в активное с неизбежной последующей коррозией. Фактически критическая концентрация CO_2 определяет продолжительность индукционного периода, без чего невозможно корректно прогнозировать долговечность железобетонных конструкций в условиях карбонизации.

Среднее содержание CO_2 в атмосфере равно примерно 0,03 % по объему. При плохой вентиляции строительные конструкции могут находиться и при более высоком содержании CO_2 . Согласно ТКП 45-2.01-111 [6] при концентрации углекислого газа до 2000 мг/м³ среда считается слабоагрессивной. В чистом воздухе концентрация углекислого газа составляет около 600 мг/м³.

Необходимо отметить, что критическая концентрация CO_2 зависит от влажности; от качества защитного слоя бетона; от типа и количества цемента; проницаемости бетона, В/Ц, времени и условий ухода за бетоном; от температуры (чем выше температура, тем больше глубина карбонизации).

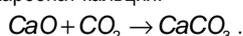
После карбонизации защитного слоя бетона на всю его глубину интенсифицируется коррозия стальной арматуры, которая является основной причиной разрушения железобетонных конструкций.

При карбонизации pH понижается. Слой оксида железа, который защищает арматуру от коррозии, разрушается, и начинается коррозия. Карбонизация – наиболее распространенная причина деградации. Чем больше пористость бетона, тем он более проницаем для диоксида углерода (CO_2), кислорода и влаги, содержащейся в атмосфере. Этот факт не влияет на долговечность собственно бетона, но крайне опасен для арматуры, которая окружается кислотной средой.

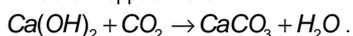
Из-за извести, которая образуется в результате гидратации портландцемента, в особенности алитового, pH-фактор в бетоне обычно велик (pH = 12-14).

При этом арматура является химически пассивной и защищенной от щелочной среды за счет изолирующего слоя (пленки) оксида железа на поверхности арматуры, который водонепроницаем, обладает высокой адгезией и предотвращает дальнейшее окисление.

На первой стадии образуется бикарбонат. Далее при взаимодействии гидроксида кальция с углекислым газом, находящимся в воздухе, образуется карбонат кальция.



Когда в изолирующий слой, окружающий арматуру в бетоне, проникает диоксид углерода, известь нейтрализуется образовавшимся карбонатом кальция, который понижает pH – фактор, в результате чего начинается коррозия стали:



Карбонизация бетона вызывает его нейтрализацию, т. е. потерю им защитных свойств по отношению к арматуре. При карбонизации бетона изменяется содержание карбонатной составляющей, по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, вызывающие деградацию бетона и снижение его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, что в соответствующих условиях способствует развитию процессов коррозии стальной арматуры различной интенсивности. Таким образом, процесс коррозионного разрушения строительной конструкции начинается с ее поверхности.

Оценка влияния технологических факторов и внешней среды на карбонизацию бетона

Эксплуатация в атмосферных условиях часто способствует разрушению железобетонных конструкций. Зависимость глубины карбонизации от ряда технологических факторов можно обобщить следующим образом:

- глубина карбонизации линейно зависит от водоцементного отношения: с увеличением В/Ц глубина карбонизации увеличивается;
- вид и содержание цемента в бетоне влияют как на способность связывать, так и на диффузионное сопротивление углекислого газа;
- глубина карбонизации обратно пропорциональна расходу цемента;

- с уменьшением содержания портландцементного клинкера в цементе карбонизация ускоряется;
- пластифицирующие добавки, как правило, замедляют процесс карбонизации в бетоне. Воздуховлакающие и газообразующие добавки способствуют уменьшению проницаемости бетона;
- условия твердения существенно влияют на скорость карбонизации (после пропаривания бетоны карбонизируются в два раза быстрее, чем при твердении в течение 28 суток в нормальных влажностных условиях);
- уход за бетоном (сохранение при твердении бетона его влажностного состояния) исключает раннее высушивание, повышается степень гидратации, а проницаемость бетона для газов с увеличением длительности ухода понижается.

Факторы внешней среды (влажность, температура) оказывают существенное влияние на скорость карбонизации бетона.

Диффузия углекислого газа в воздухе происходит примерно в 10000 раз быстрее, чем в воде, увлажняющей защитный слой бетона. В водонасыщенном бетоне карбонизация практически не развивается. Карбонизация бетона в воздушно-сухих условиях (карбонизация бетона в наружной атмосфере, защищенной от прямого воздействия атмосферных осадков (под навесом)) протекает в 3–4 раза медленнее, чем внутри сухих отапливаемых помещений.

С увеличением температуры скорость карбонизации возрастает. Для конструкций, подвергающихся тепловым воздействиям, и конструкций в районах с жарким сухим климатом следует учитывать ускорение процесса карбонизации.

При отрицательных температурах карбонизацией практически можно пренебречь (по данным Розенталя Н. К. [7], скорость поглощения углекислого газа при температуре минус 8 °С примерно в 5 раз меньше, чем при температуре плюс 22 °С). При натуральных обследованиях и в расчетах долговечности длительность карбонизации бетона необходимо корректировать с учетом продолжительности эксплуатации конструкции в различное время года.

Концентрация углекислого газа заметно влияет на процесс карбонизации, скорость которого повышается с увеличением содержания углекислого газа. Повышение концентрации углекислого газа является одним из наиболее значимых факторов.

При воздействии постоянно дующих ветров большой силы бетон конструкций со стороны преимущественного направления и с противоположной стороны карбонизировался в 1,5–2,0 раза глубже, чем с других сторон. Причиной этого может быть поступление воздуха не только путем обычной диффузии, но и под влиянием изменяющегося давления при порывах ветра.

Начиная с относительной влажности воздуха около 40%, на поверхности пор образуется тонкая пленка воды. При наличии в поровом пространстве газовой фазы на поверхности пор происходит реакция образования кислоты, которая взаимодействует с гидратированными минералами цементного камня и бетона. Таким образом, взаимодействие ангидридов сильных и слабых кислот во влажной среде способствуют образованию слаборастворимых солей на поверхности пор.

Одним из наиболее важных процессов таких реакций является карбонизация. По своей сути это обратимая реакция взаимодействия гидроксида кальция, который может содержаться в бетоне в свободном виде или образуется в результате гидратации минералов портландцементного клинкера со слабой угольной кислотой. Причем, при различных значениях pH угольная кислота может находиться в разных формах. Так, при pH > 8,36 гидрокарбонаты находятся в равновесии с карбонатами, при pH = 4... 8, 36 угольная кислота находится в равновесии с гидрокарбонатами, при pH < 4 в воде присутствует только свободная угольная кислота. Отсюда следует то, что при снижении значения pH агрессивность внешней среды увеличивается.

Изменение значения pH в сторону его уменьшения зависит в большей степени от содержания оксидов серы и азота во внешней среде, а так же содержания хлоридов, входящих в состав бетона в виде различных добавок.

Кроме того, изменение pH среды может быть вызвано образованием других более активных кислот, которые способны не только вступать в реакции взаимодействия с минералами цементного камня, но и усиливать растворение образовавшихся карбонатов кальция, магния и других металлов. В результате этих процессов образуются соли, обладающие большей растворимостью, чем карбонаты. Эта реакция сопровождается выделением CO₂. Результатом такого взаимодействия являются процессы перекристаллизации, которые необратимо приводят к дефектам и последующему разрушению цементного камня и бетона.



Поэтому, при изучении процессов карбонизации и определении степени карбонизации недостаточно определять только значение pH водных вытяжек, поскольку этот показатель характеризует кислотность среды, обусловленную не только содержанием карбонатов, но и других более растворимых солей, способных при гидролизе образовывать сильные кислоты.

Наиболее точным при определении степени карбонизации является метод, основанный на растворении навески бетона в соляной кислоте с последующим улавливанием углекислого газа [8].

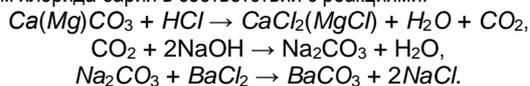
Степень карбонизации бетона образцов, отобранных из дымовой трубы, характеризовали содержанием химически связанного цементным камнем диоксида углерода (CO₂) в виде карбонатов кальция в исследуемой средней аналитической пробе бетона и определяли по СТБ 1481-2011 [9].

Методика определения степени карбонизации

Для определения содержания степени карбонизации бетона используют навеску, приготовленную из образцов-кернах, отобранных по ГОСТ 28570, из эксплуатирующихся железобетонных конструкций и (или) образцов-сколов, образующихся при определении прочности бетона конструкций по ГОСТ 22690, а также образцов, отобранных любыми другими способами.

Из образцов сколов отделили внешний слой бетона, равный по глубине защитному слою. Отделенные фрагменты защитного слоя объединили в единичную пробу бетона, которую измельчили в фарфоровой ступке ударами, не растирая, и отделили крупный заполнитель. Пробу высушили при температуре (105±5) °C до влажности (1,5±0,5) %, дополнительно измельчили в фарфоровой ступке для отделения цементного камня от заполнителя и сформировали из нее для анализа среднюю аналитическую пробу массой (10±1)г путем просеивания через сито с сеткой № 0063 по ГОСТ 6613, которую поместили в стеклянный стакан для взвешивания с притертой крышкой. Затем ее высушили в сушильном шкафу при температуре (105±5) °C до постоянной массы, после чего охладили. Вычислили массу сухой навески.

Сущность метода состоит в растворении навески, отобранной из средней аналитической пробы бетона, в соляной кислоте и поглощении выделяющегося при этом диоксида углерода раствором гидроксида натрия, с последующим осаждением карбонат-иона добавлением хлорида бария в соответствии с реакциями:

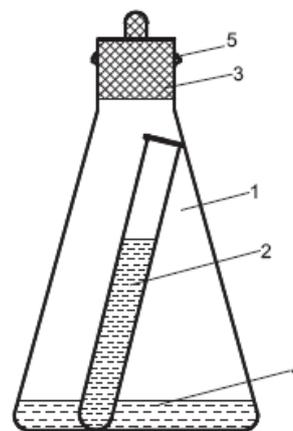


Остаток свободного гидроксида натрия титруют соляной кислотой до изменения окраски индикатора — фенолфталеина.

Для связывания сероводорода, выделение которого возможно при разложении сульфидов, содержащихся в аналитической пробе бетона, в раствор соляной кислоты вводят сульфат меди.

Были отобраны навески массой 0,3000г из высушенной до постоянной массы средней аналитической пробы бетона, далее завернуты в папиросную бумагу размерами 5×5 см. В колбу емкостью 250 см³ отбрали бюреткой 15,0 см³ 0,2Н раствора гидроксида натрия, добавили к нему 4 капли индикатора фенолфталеина, после чего титровали 0,2Н-титрованным раствором соляной кислоты (16,6 см³) до перехода окраски гидроксида натрия из малиновой в бесцветную. Рассчитали коэффициент поправки, который составил 1,1.

Собрали прибор для определения степени карбонизации бетона (см. рисунок 4).



1 – коническая колба со шлифом вместимостью 500 см³; 2 – пробирка с раствором гидроксида натрия; 3 – притертая пробка; 4 – смесь растворов соляной кислоты и сульфата меди; 5 – уплотнение из пластилина

Рисунок 4 – Прибор для определения степени карбонизации бетона

В коническую колбу объемом 500 см³ влили, не смачивая стенок колбы, с помощью цилиндра 20 см³ раствора соляной кислоты концентрацией 1:1 и 4 мл 20 %-го раствора сульфата меди. Опустили пробирку в колбу. В пробирку внесли пипеткой 15 см³ 0,2Н раствора гидроксида натрия. Опустили пакетик с навеской в смесь растворов соляной кислоты и сульфата меди. Колбу сразу же плотно закрыли пробкой и дополнительно герметизировали пластилином (см. рис. 5).

Приготовили две холостые пробы. В две конические колбы V= 500 см³ последовательно вливали соляную кислоту и сульфат меди, опускали пробирки, в которые также вливали по 15 см³ 0,2Н раствора гидроксида натрия (холостой раствор). Колбы плотно закрывали пробкой и герметизировали пластилином.



Рисунок 5 – Пробы исследуемого бетона

Продолжительность растворения навески составила 18 ч. Затем заполнили бюретку 0,2Н-титрованным раствором соляной кислоты. В коническую колбу для титрования V=250 см³ с помощью цилиндра предварительно влили 20 см³ 10 %-го раствора хлорида бария. Аналогично титровали свободный гидроксид натрия из второй пробы холостого опыта, после чего приступили к титрованию свободного гидроксида натрия основного опыта.

Из колбы извлекли пробирку с раствором гидроксида натрия. Содержимое пробирки аккуратно перенесли в коническую колбу объемом 250 см³ с 10 %-м раствором хлорида бария, добавили 3 капли фенолфталеина и сразу же титровали при энергичном перемешивании 0,2Н раствором соляной кислоты до перехода малиновой окраски содержимого колбы в бесцветную.

Рассчитали содержание химически связанного цементным камнем диоксида углерода CO_2 по формуле:

$$CO_2 = \frac{0,0044 \cdot (A - B) \cdot K_{HCl/NaOH}}{m} \cdot 100,$$

где A – объем титрованного раствора соляной кислоты 0,2 Н концентрации, израсходованного на титрование холостого раствора в результате холостого опыта, cm^3 ;

B – объем титрованного раствора соляной кислоты 0,2 Н концентрации, израсходованного на титрование навески, cm^3 ;

$K_{HCl/NaOH}$ – коэффициент, выражающий объемное соотношение между концентрациями растворов HCl и $NaOH$;

m – масса навески, г.

Результаты исследований

Степень карбонизации проб бетона, отобранного из внутренней и внешней части трубы [10] на разных высотных отметках, составила (см. табл. 1 и рис. 6).

Для контроля для отобранных проб бетона было также определено pH (см. табл. 1).

Таблица 1 – Степень карбонизации и pH исследуемого бетона

Отметка	Степень карбонизации, %	
	pH	
	Сторона трубы	
	внутренняя	наружная
+40.000	62,5	59,4
	8,95	9,72
+70.000	46,7	30,0
	10,12	10,21
+100.000	56,2	30,8
	9,84	10,17
+115.000	24,6	80,0
	10,37	9,58

В среднем в бетоне для пассивации стали pH должно находиться в пределах 11,5..12,5. При значениях pH менее 11,5 действие пассивации прекращается и начинается коррозия стали. Снижение щелочности бетона произошло в результате внешнего воздействия агрессивных сред, что и подтвердили полученные данные по степени карбонизации.

Заключение

На основании анализа результатов определения степени карбонизации бетона, отобранного из дымовой трубы, сделаны следующие обобщающие выводы:

1. Снижение степени карбонизации по внутренней стороне бетона при увеличении значения высотной отметки можно объяснить снижением температуры выбросов (*дымовые газы, водяной пар, высокая температура выбросов – мощные катализаторы процессов карбонизации бетона*);
2. Разницу показателей степени карбонизации на отметке 115,000 с внутренней и наружной стороны 24,6% и 80% соответственно, можно объяснить степенью рассеивания примесей (кислых газов), содержанием влаги в атмосферном воздухе, а также атмосферными осадками снаружи, и скоростью выхода газопаровоздушной смеси с внутренней стороны. В данном случае требует уточнения, предусмотрена ли защита от попадания влаги в устье трубы;

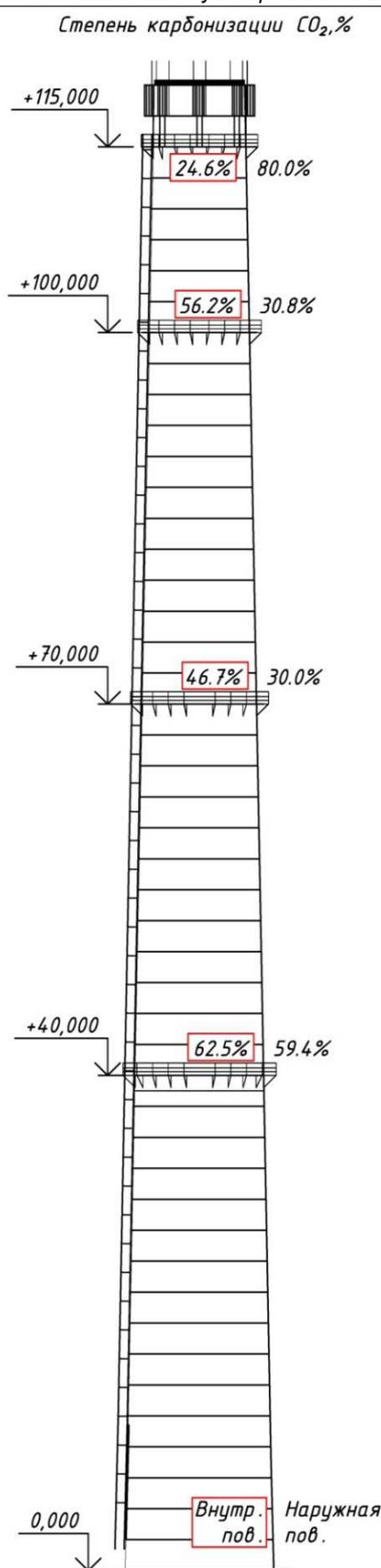


Рисунок 6 – Степень карбонизации бетона на разных отметках

3. При сжигании природного газа, содержащего до 90% метана, образуется приблизительно 20% по объему водяных паров. Температура точки росы продуктов сжигания природного газа равна 55–60°C. При сложившейся в последние годы тенденции снижения нагрузок на энергоблоках и объема эвакуируемых через трубу дымовых газов снижаются их скорость, коэффициент конвективного переноса тепла к футеровке, ее температура и повышается вероятность или усиливается процесс конденсации. Заметное влияние такого фактора проявляется при скорости газов в устье трубы менее 6 м/с. В дымовых трубах при скорости газов ниже 6 м/с коэффициент теплоотдачи со стороны газов $\alpha_{\text{вн}}=2,32\text{--}5,8$ ккал/(м²×ч×°С) вместо 11,6–34,8 ккал/(м²×ч×°С) при скорости дымовых газов 6–20 м/с. Соответственно при низкой температуре (до 100°C) поступающих в трубу дымовых газов и низкой скорости (до 6 м/с) температура внутренней поверхности трубы становится ниже температуры точки росы. При этих условиях происходит образование конденсата внутри трубы. Происходит фильтрация конденсата и насыщение влагой футеровки, теплоизоляции и бетона ствола.
4. На отметке +40.000 с внешней стороны степень карбонизации почти такая же, как и внутри, хотя и должна уменьшаться. Этот феномен объясняется технологическими издержками – в месте отбора данной пробы отсутствовал утеплитель.
5. Следует отметить, что определение степени карбонизации позволяет оперировать количественными характеристиками и оценивать интенсивность протекающих процессов в отличие от упрощенного подхода, когда карбонизацию оценивают по изменению окраски при воздействии индикатора. Кроме того, численные показатели позволяют проанализировать совокупный вклад каждого из эксплуатационных факторов в результирующее развитие коррозионных процессов. Особенно это актуально для сложных инженерных сооружений, таких как дымовые трубы, подвергаемые не только значительным ветровым и температурным воздействиям извне, но и испытывающие воздействие агрессивных высокотемпературных газов, движущихся внутри трубы.

Список цитированных источников

1. Андreyuk, V. S. Повышение эксплуатационной надежности промышленных труб. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/40849/Povyshenie_ekspluatatsionnoj_nadezhnosti_promyshlennyh_trub.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Frederiksen, J. M. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations / J. M. Frederiksen, L. Mejlbro & E. Poulsen // Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing on Modelling the Chloride Ingress into Concrete. – Paris, 2000. – P. 317–336.
3. Материалы Sika для дымовых труб и градирен из железобетона. Руководство для инженеров-проектировщиков. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mpkm.org/attachments/get/881/7.-materialy-sika-dlya-dymovykh-trub-i-gradire.pdf>.
4. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
5. Москвин В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
6. Защита строительных конструкций от коррозии. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.01-111-2008 (02250). – Минск, 2009 – 86 с.
7. Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости : дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / Н. К. Розенталь, НИИЖБ. – М., 2004. – 432 с.
8. Moller, J. S. Measurement of carbonation in cement based material, Publication P-93 : II, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology. – Goteborg, 1994.
9. Бетоны конструкционные мостовых сооружений. Методы определения хлоридов и степени карбонизации : СТБ 1481-2011. – Минск, 2012 – 12 с.
10. Отчет по Х/Д 19/192 от 27.11.2019 «Определение степени карбонизации бетона, отобранного на объекте «Детальное обследование дымовой трубы с надземными газоходами в здании котельного цеха по ул. Славинского, 4 в г. Гродно». – Брест : БрГТУ, 2019 – 14 с.

References

1. Andreyuk, V. S. Povyshenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti promyshlennyh trub. https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/40849/Povyshenie_ekspluatatsionnoj_nadezhnosti_promyshlennyh_trub.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Frederiksen, J. M. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations / J. M. Frederiksen, L. Mejlbro & E. Poulsen // Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing on Modelling the Chloride Ingress into Concrete. – Paris, 2000. – R. 317–336.
3. Материалы Sika для дымовых труб и градирен из железобетона. Руководство для инженеров-проектировщиков. <https://mpkm.org/attachments/get/881/7.-materialy-sika-dlya-dymovykh-trub-i-gradire.pdf>.
4. Alekseev, S. N. Korroziionnaya stojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij v agressivnoj promyshlennoj srede / S. N. Alekseev, N. K. Rozental'. – М.: Strojizdat, 1976. – 205 s.
5. Moskvin, V. M. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashchity. – М. : Strojizdat, 1980. – 536 s.
6. Zashchita stroitel'nyh konstrukcij ot korrozii. Stroitel'nye normy proektirovaniya : ТКП 45-2.01-111-2008 (02250). – Минск : 2009 – 86 s.
7. Rozental', N. K. Korroziionnaya stojkost' cementnyh betonov nizkoj i osobo nizkoj pronicaemosti : dis. d-ra tekhn. nauk : 05.23.05 / N. K. Rozental', NIIZHB. – М., 2004. – 432 s.
8. Moller, J. S. Measurement of carbonation in cement based material, Publication P-93 : II, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology. – Goteborg, 1994.
9. Betony konstrukcionnye mostovyh sooruzhenij. Metody opredeleniya hloridov i stepeni karbonizacii : STB 1481-2011. – Minsk, 2012 – 12 s.
10. Otchet po H/D 19/192 ot 27.11.2019 «Opredelenie stepeni karbonizacii betona, otobranogo na ob'ekte «Detal'noe obsledovanie dymovoj truby s nadzemnymi gazohodami v zdanii kotel'nogo cekha po ul. Slavinskogo, 4 v g. Grodno». – Brest: BrGTU, 2019 – 14 s.

Материал поступил в редакцию 14.02.2020