

## Дефекты железобетонных дымовых труб в современных условиях эксплуатации

Валентин Алексеевич Ермаков, Сергей Алексеевич Николаев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проанализировано возникновение дефектов на железобетонных стволах дымовых труб в настоящих условиях эксплуатации. Изучена история строительства железобетонных дымовых труб. Используются общепризнанные обзорно-аналитические методы исследования. Проведена аналитическая работа по действующим способам устранения дефектов на железобетонных стволах, сделан вывод о неэффективности данных решений.

**Материалы и методы.** Выполнены обследования железобетонных дымовых труб, построенных в 1950–1980 гг., включающие изучение конструктивных особенностей и способов строительства, анализ условий эксплуатации, визуальное обследование, а также обследование строительных конструкций разрушающим и неразрушающим методами контроля. Выявлены взаимосвязи конструктивных решений железобетонного ствола к действующим нагрузкам от подключенных устройств к газоотводящему стволу, влияющих на внутреннюю и, как следствие, внешнюю оболочку железобетонных труб, в связи с переходом на другой вид топлива, которое не соответствует дымовой трубе по проекту. Осуществлен анализ возникновения дефектов и современные способы их устранения.

**Результаты.** Установлено в ходе обследования, что с возникновением дефектов, образованных от перехода с твердого на газообразное топливо, несущая способность железобетонных дымовых труб резко снижается, что приводит к аварийности сооружений. Современные методы устранения дефектов вызывают большие по площади разрушения, так как временно устраняют только последствия, но не устраняют причины возникновения дефектов железобетонных дымовых труб. В связи с этим появляется опасность для работы технических устройств, подключенных к дымовым трубам, зданиям, находящимся в непосредственной близости к сооружениям, а также опасность для жизни работающего персонала.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют обоснованно говорить о неэффективности современных способов устранения дефектов, которые имеют краткосрочный эффект и способствуют большим разрушениям, приводя сооружения к аварийному состоянию.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железобетонные дымовые трубы, дефекты, газоотводящий ствол, бетон, арматура, конденсат, выщелачивание свободной извести, несущая способность, остаточный ресурс

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ермаков В.А., Николаев С.А. Дефекты железобетонных дымовых труб в современных условиях эксплуатации // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 2. С. 32–44. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.32-44

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, [Ermakov@mgsu.ru](mailto:Ermakov@mgsu.ru).

## Defects of reinforced concrete chimneys in modern operating conditions

Valentin A. Ermakov, Sergey A. Nikolaev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper is devoted to the analysis of the occurrence of the defects on reinforced concrete chimney shafts under current operating conditions. The history of the construction of reinforced concrete chimneys was studied. This paper uses generally accepted survey and analytical research methods. Analytical work was carried out on current methods for eliminating defects in reinforced concrete shafts and a conclusion was made on the ineffectiveness of these solutions.

**Materials and methods.** Inspections of reinforced concrete chimneys built in 1950–1980 were carried out, including the study of design features and construction methods, analysis of operating conditions, visual inspection, as well as inspection of building structures using destructive and non-destructive testing methods. An analysis was carried out to identify the relationships between the design solutions of the reinforced concrete shaft and the current loads from the connected devices to the gas outlet shaft, affecting the internal and, as a consequence, the outer shell of reinforced concrete pipes, in connection with the transition to another type of fuel, which does not correspond to the chimney according to the project. An analysis of the occurrence of defects and modern methods for eliminating them were carried out.

**Results.** It was established during the survey that with the occurrence of defects formed from the transition from solid to gaseous fuel, the load-bearing capacity of reinforced concrete chimneys is sharply reduced, which leads to the failure

of structures. Modern methods of defect elimination cause greater destruction in terms of area, as they temporarily eliminate only the consequences, but do not eliminate the causes of defects in reinforced concrete chimneys. In this connection, there is a danger to the operation of technical devices connected to the chimneys, to the buildings in close proximity to the structures, as well as a danger to the life of the operating personnel.

**Conclusions.** The results obtained allow us to reasonably speak about the ineffectiveness of modern methods of eliminating defects, which in turn has only a short-term effect and contributes to great destruction, leading structures to an emergency condition.

**KEYWORDS:** reinforced concrete chimneys, defects, gas exhaust shaft, concrete, reinforcement, condensate, leaching of free lime, bearing capacity, residual life

**FOR CITATION:** Ermakov V.A., Nikolaev S.A. Defects of reinforced concrete chimneys in modern operating conditions. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(2):32-44. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.32-44

*Corresponding author:* Valentin A. Ermakov, Ermakov@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Строительство первых промышленных дымовых труб началось в XVIII в. Они были необходимы для функционирования доменных печей, используемых для выплавки чугуна. Первая доменная печь построена в 1709 г. по проекту английского изобретателя Абрахама Дерби [1]. Для таких печей и для иных процессов производства не требовались высокие дымовые трубы. Проходила модернизация в каждой отрасли, в том числе и производственной, которая и предрасположила к возведению более высоких, чем в те времена, дымовых труб. Основным материалом для строительства таких сооружений стали железобетонные конструкции<sup>1</sup>.

В настоящее время в России эксплуатируется огромное количество железобетонных дымовых труб, только в Москве на станциях тепло- и электроснабжения в эксплуатации находится свыше 35 подобных сооружений.

С целью обеспечения городов теплом и электроэнергией в больших объемах и с переходом от печей в домах к предприятиям по выработке энергии запустили строительство теплоэлектростанций (ТЭЦ). Ни одно предприятие, использующее в своем перечне оборудования для сжигания топлива, не обходится без строительства дымовых труб.

В период 1950–1980 гг. многие старые угольные ТЭЦ были закрыты или переоборудованы для сжигания природного газа (ПГ). Это связано с тем, что ПГ более эффективное и экологически чистое топливо, к тому же запасы угля начали истощаться [2]. Произошла модернизация котлов с переходом от твердого топлива [3] на газообразное, однако возник вопрос, как новое топливо будет взаимодействовать с конструкциями железобетонных дымовых труб и как это повлияет на работу всех ТЭЦ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дымовая труба — вертикально расположенное сооружение, которое служит для отвода продук-

тов сгорания в верхние слои атмосферы. Принцип действия основан на эффекте тяги, который обеспечивает перемещение газов по всей длине ствола от впускного к выпускному отверстию трубы. Ствол трубы имеет форму по горизонтали круглую, овальную или многоугольную, по вертикали — форму цилиндра или усеченного конуса. Высотой промышленные дымовые трубы могут достигать нескольких сотен метров, к примеру, высота самой высокой трубы на сегодняшний день составляет 420 м, она была возведена в 1988 г. на Экибастузской ГРЭС-2 (Казахстан) [4].

Важнейшей частью дымовой трубы является железобетонная оболочка — ствол дымовой трубы: одноствольный или многоствольный. Одноствольные дымовые трубы состоят из наружного слоя оболочки, тогда как многоствольная конструкция предполагает устройство «труба в трубе», иными словами, в трубе сооружают несколько стволов от тепловых агрегатов с вентилируемым пространством между ними, в котором предполагается устройство площадок. Основным достоинством многоствольной трубы служит защита несущего железобетонного ствола от агрессивной среды отводимых газов. Газоотводящий ствол выполняет функции несущей конструкции и обеспечивает устойчивость трубы при воздействии различных факторов окружающей среды. Поэтому еще на этапе проектирования необходимо иметь следующие исходные данные, которые и будут основополагающими при строительстве сооружений<sup>2</sup>:

1. Режим работы трубы и характеристика отводимых газов (состава, концентрации, температуры, влажности, количества и скорости движения газов в стволе, состава и количества пылевидных частиц, химического состава и количества конденсата).

2. Эскизы поперечного сечения газоходов у ввода в трубу с указанием основных размеров.

<sup>2</sup> Инструкция по проектированию железобетонных дымовых труб. НИИЖБ, Главтепломонтаж, Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт «Теплопроект». 1962.

<sup>1</sup> СП 13-101–99. Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб.

3. Информацию о грунтах (геологических разрезов буровых скважин в количестве не менее трех скважин глубиной 10–12 м, равномерно расположенных с наружной стороны предполагаемого под трубу фундамента на расстоянии не более 5 м от края плиты), возможном закислении или защелачивании грунта в период эксплуатации трубы, положении грунтовых вод и их химическом составе.

4. Схемы фундаментов смежных с трубой сооружений и давлений на грунт под ними.

5. Сведения о высоте трубы и диаметре устья.

6. Для сейсмических районов — информацию о максимальной силе землетрясений за последние 20 лет.

7. Для районов вечной мерзлоты — о мощности и глубине заложения деятельного и вечномерзлого грунта.

Стволы одноствольных железобетонных монолитных дымовых труб (рис. 1) представляют собой усеченный полый конус, но с переменным уклоном образующей наружной поверхности от 8 до 1,5 % с убыванием по высоте. Верхнюю часть ствола на 1/3 высоты трубы рекомендуется выполнять цилиндрической формы. По высоте ствол железобетонной монолитной трубы имеет переменную толщину, причем минимальная толщина в верхней его части по соображениям долговечности и для обеспечения возможности качественного уплотнения бетонной смеси вибратором принимается при верхнем внутреннем диаметре до 4,8 м не менее 160 мм; при диаметре от 4,8 до 7,2 м — не менее 180 мм; от 7,2 до 9 м — не менее 200 мм; свыше 9 м — не менее 250 мм [5].

Ствол трубы разбивается по высоте на участки с постоянной толщиной стенки. Толщина стенки ствола изменяется в местах перехода от одного участка к другому, как правило, в местах устройства консолей для опирания футеровки или несущих конструкций внутренних газоотводящих стволов. Стволы монолитных железобетонных труб армируются вертикальной и горизонтальной арматурой, устанавливаемой как у наружной, так и у внутренней поверхности стенки ствола. Сечение арматуры определяется расчетом. Для армирования используется арматура периодического профиля. В старых трубах арматура может быть гладкого профиля, причем однорядная, только у наружной поверхности стенки<sup>2</sup>.

Проект дымовой трубы должен содержать расчеты:

1. Расчет прочности и устойчивости железобетонной дымовой трубы.

При расчете прочности и устойчивости дымовых труб учитываются следующие факторы:

- нагрузка от собственного веса трубы;
- ветровая нагрузка;
- температурные воздействия;
- сейсмическая активность.

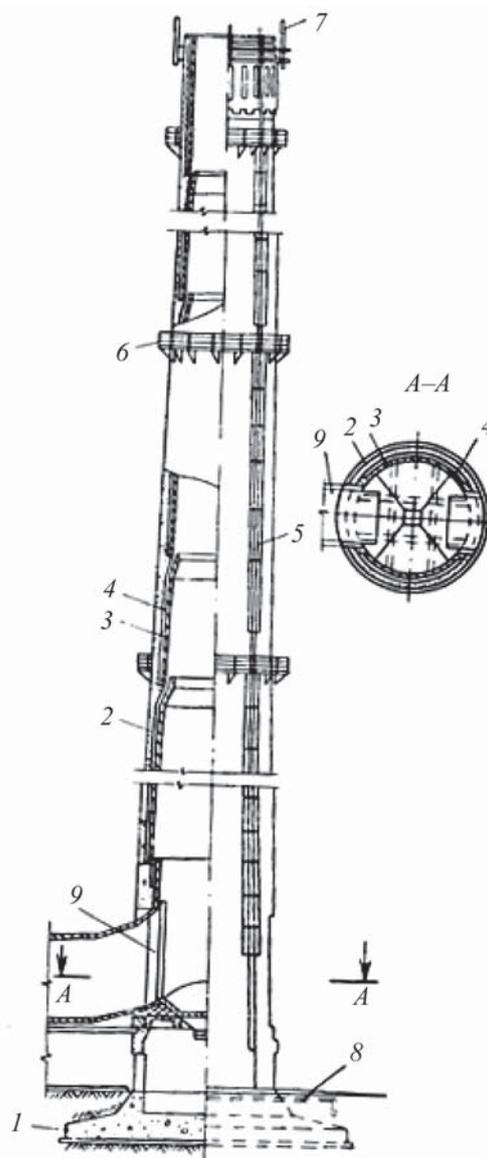


Рис. 1. Схема железобетонной дымовой трубы: 1 — фундамент; 2 — ствол; 3 — футеровка; 4 — теплоизоляция; 5 — ходовая лестница; 6 — светофорная площадка; 7 — молниеотвод; 8 — заземление молниеотвода; 9 — вход газохода

Расчет прочности и устойчивости осуществляется с использованием методов строительной механики и сопротивления материалов.

2. Расчет дымового тракта.

При проектировании дымовых труб также необходимо выполнить расчет дымового тракта, который включает определение аэродинамических характеристик дымовой трубы, выбор оптимального диаметра и высоты трубы, а также расчет потерь давления в дымовом тракте.

3. Расчет коррозионной стойкости.

Для обеспечения долговечности дымовых железобетонных труб следует провести расчет коррозионной стойкости. При этом учитываются такие факторы, как состав дымовых газов, температура

и влажность внутри трубы, наличие агрессивных веществ в дымовых газах и др.

#### 4. Расчет теплотехнических характеристик.

Теплотехнический расчет дымовых труб проводится для определения оптимальных параметров теплоизоляции и выбора материалов для ее выполнения.

Для защиты несущего ствола дымовой трубы от температурного и агрессивного воздействия отводимых газов в необходимых случаях применяется футеровка и тепловая изоляция ствола. В зависимости от температуры и агрессивности отводимых газов футеровку следует выполнять из шамотного, кислотоупорного или глиняного обыкновенного кирпича, специального бетона, керамики, стали, а также пластмасс [6].

Футеровка из кирпича предусматривается звеньями, опирающимися на консольные выступы в стволе. Высота звеньев должна быть не более 25 м при толщине в один кирпич и не более 12,5 м при толщине в 1/2 кирпича. В зоне проемов для газоходов толщину футеровки следует увеличивать до 1,5–2 кирпичей. При применении специальной фасонной шпунтовой керамики толщина футеровки может быть уменьшена. Примыкание нижнего звена к вышележащему необходимо проектировать с учетом роста футеровки (в результате процессов сульфатации материала швов кладки) и температурного расширения материала футеровки как по высоте, так и по диаметру<sup>3</sup>.

Обследование железобетонных дымовых труб является обязательной частью их эксплуатации. Проведение мониторинга состояния промышленных сооружений позволяет своевременно выявлять нарушения, возникающие в конструкциях в процессе эксплуатации, и оперативно их устранять [7].

<sup>3</sup> СП 375.1325800.2017. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования.

Для оценки технического состояния дымовых труб обследование включает<sup>1</sup>:

- 1) визуальный и измерительный контроль;
- 2) тепловизионный контроль;
- 3) геодезический контроль;
- 4) контроль прочностных характеристик конструкций;
- 5) расчеты строительных конструкций;
- 6) оценку остаточного ресурса.

Основными влияющими факторами на несущую конструкцию, а именно железобетонный ствол, являются отложения изнутри, иначе золовые отложения [8, 9], которые в свою очередь сокращают сечение дымохода и разрушения изнутри дымовой трубы под действием агрессивных газов и влияние отходящих дымовых газов от котлоагрегатов<sup>4</sup>.

Таким образом, с переходом на газообразное топливо настоящие дымовые трубы не соответствуют конструкции по проекту, что оказывает существенное влияние на железобетонный ствол.

Данные дефекты можно наблюдать на начальных стадиях их развития. Один из способов наблюдения — тепловизионное обследование (рис. 2), на котором можно заметить температурные сдвиги, что в свою очередь подтверждает снижение газоплотности футеровки дымовой трубы [10, 11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам обследования в настоящее время стали выявляться дефекты и повреждения категории «В» и «Б»<sup>5</sup>, а именно дефекты железобетонного ствола:

<sup>4</sup> РД 34.20.328–95. Методика обследования дымовых труб тепловых электростанций.

<sup>5</sup> СТО 17230282.27.010.001–2007. Стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС России» «Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния».

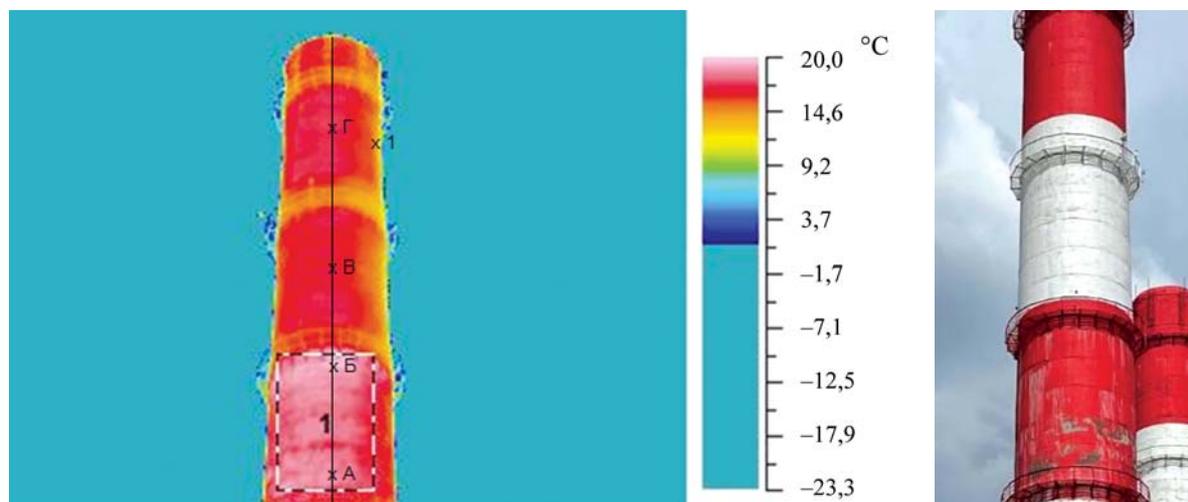


Рис. 2. Результат тепловизионной съемки железобетонной дымовой трубы высотой  $h = 120,0$  м, на котором прослеживается температурный сдвиг  $\Delta t \geq 9,0$  °С, свидетельствующий о нарушении газоплотности футеровки и разрушении защитного слоя бетона

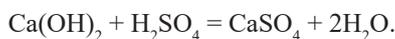
- разрушения защитного слоя бетона;
- фильтрация влаги сквозь тело бетона;
- оголение и коррозионный износ оголенной арматуры;
- обратный уклон чугунного оголовка дымовой трубы;
- отсутствие защитной обмазки на футеровке.

Данные дефекты вызваны одной из следующих причин.

При сжигании ПГ происходят химические реакции окисления компонентов ПГ кислородом. Формула реакции:



Содержащийся в ПГ сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) может образовывать соединения серы при сжигании газа на ТЭЦ. Сера, присутствующая в ПГ, может образовывать оксиды серы при сжигании, такие как диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) и трехокись серы ( $\text{SO}_3$ ). В случае, если в трубе образуется «точка росы», начинается конденсация газообразных отходов. Конденсат без примесей кислот и сульфатов вызывает коррозию материала первого вида — выщелачивание свободной извести из цементного камня бетонов и растворов [12]. При наличии в конденсате серной кислоты происходит коррозия второго вида — разрушение кислотой цементного камня в бетонах и растворах и кирпича в кладке. Реакция выражается формулой [13, 14]:



Так как в трубе присутствует водяной пар, то сернистые соединения дают с ним серную кислоту. Образование такого агрессивного конденсата представляет для трубы большую опасность. Если имеет место сильный перепад температур наружного воздуха и дымовых газов внутри трубы, начинается миграция влаги: проникая внутрь железобетонного ствола, кислота начинает разъедать арматуру и камень [14, 15]. Появившиеся трещины в результате коррозии арматуры (шириной раскрытия до 0,05 мм) не представляют непосредственной опасности разрушения, однако они способствуют ускорению разрушения железобетона [16]. На наружной поверхности труб иногда можно увидеть белесые пятна (рис. 4) — это и есть конденсат, проникающий сквозь футеровку и ствол [17]. Зимой такая влага превращается в лед [18, 19]. Образованный конденсат возникает на внутренней поверхности ствола дымовой трубы, а именно на консолях для футеровки (рис. 3), это вызвано переходом ТЭЦ с сжигания твердого топлива (угля) на ПГ, как основного топлива, а также снижением фактических режимов эксплуатации.

Образующийся конденсат приводит к процессу фильтрации влаги сквозь тело бетона, сопровождающийся выщелачиванием свободной извести по ослабленным сечениям, уменьшая значения

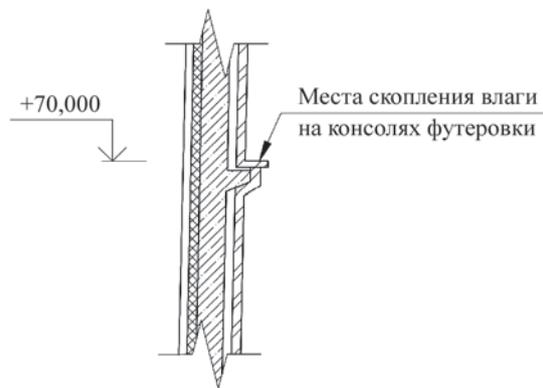


Рис. 3. Консоли футеровки, где обильно скапливается конденсат при средней высоте дымовой трубы 120,0 м от поверхности земли и диаметре устья 7,0 м



Рис. 4. Процесс выщелачивания свободной извести по ослабленным сечениям бетона

прочности бетона (табл., рис. 4), а также к коррозии арматуры [13, 15, 20].

Анализ результатов испытаний показывает снижение прочности железобетонного газоотводящего ствола от проектного класса бетона (В22,5) с отметки +53,500 и выше. Самые существенные отклонения наблюдаются на отметках от 2/3 высоты дымовой трубы. Это связано с тем, что дымовые трубы работают не в полную мощность, в ходе чего внутри дымовой трубы создается избыточное давление. Выходящие дымовые газы по мере эвакуации из дымовой трубы остывают и, задерживаясь в газоотводящем стволе, достигают точки росы, образуя на внутренней поверхности конденсат. Осевшая влага скапливается на консолях и стенках, проникая внутрь железобетонного ствола, тем самым снижая прочностные характеристики бетона.

Данные дефекты свидетельствуют о нарушении газоплотности дымовой трубы, что в свою очередь может при развитии повреждения перейти

Результаты измерений фактической прочности бетона на разных высотных отметках дымовой трубы высотой  $h = 120,0$  м

Отметка уровня	Проектный класс (марка) бетона железобетонной обоймы $R$	Значение прочности на участках $R_p$ , МПа	Соответствие фактическому классу (марке) бетона
+1,800	M300	28,9	B22,5 (M300)
+15,500	M300	29,1	B22,5 (M300)
+38,500	M300	32,0	B22,5 (M300)
+53,500	M300	23,9	B15 (M200)
+68,500	M300	09,5	B7,5 (M100)
+83,500	M300	09,3	B5 (M75)
+95,500	M300	22,5	B15 (M200)
+100,000	M300	25,9	B20 (M250)
+113,000	M300	14,3	B10 (M150)

в категорию «А»<sup>6</sup> и привести к аварийному состоянию дымовой трубы в целом.

Таким образом, на данный момент времени с переходом с твердого на газообразное топливо возникли дефекты на железобетонных стволах дымовых труб. Условия эксплуатации дымовой трубы *не соответствуют конструкции сооружения по проекту*. Действующие способы ликвидации дефектов устраняют лишь *последствия* уже образованных дефектов на газоотводящих стволах, но не устраняют *причины* возникновения дефектов. В местах образованных дефектов железобетонного ствола используют нанесение ремонтного состава, имеющего хороший уровень адгезии с бетоном, маскируя разрушения оболочки дымовой трубы. Как правило, ремонтные составы, нанесенные на материал, имеют марку по водонепроницаемости выше, чем у бетона, применяемого при строительстве дымовых труб, тем самым влага начинает проникать по периметру нанесения ремонтного состава. Со временем происходит процесс обрушения ослабленного бетона вместе с нанесенным ремонтным составом, чтократно увеличивает площадь разрушений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из ответственных элементов ТЭЦ являются дымовые трубы, предназначенные для отвода продуктов сгорания от котлоагрегатов. Наибольшее распространение получили дымовые трубы из железобетона. С 1960 по 1980 г. большинство ТЭЦ было переориентировано на сжигание ПГ вместо твердого топлива (угля). При этом были модернизированы котлоагрегаты, а конструкции дымовых труб остались в первоначальном состоянии. Смена типа топлива привела не только к изменению хи-

мического состава отходящих газов, но и к корректировке режима работы котлоагрегатов, что отразилось на периодичности и величине воздействий газов на несущие конструкции трубы.

Результаты обследований дымовых труб из железобетона, работающих в условиях сжигания ПГ, показывают, что остаточный ресурс стремительно сокращается за счет ускоренного развития дефектов и повреждений конструкций, по опыту проведенных обследований это не наблюдалось в дымовых трубах при сжигании твердого топлива. Отмечается фактическое снижение газоплотности футеровки и повышенное скопление конденсата на консолях дымовых труб из-за неравномерности подачи отходящих газов от котлоагрегатов. Образующийся конденсат приводит к выщелачиванию свободной извести по ослабленным сечениям конструкции и коррозии арматуры вследствие фильтрации влаги сквозь тело бетона.

В настоящее время для восстановления несущей способности железобетонного ствола в основном используют ремонтные составы, обладающие высокой прочностью. В результате существует опасность отделения ремонтного состава единым массивом с фрагментами бетона, что при падении может привести к травмированию персонала, повреждению технического оборудования и близлежащих конструкций. Применение ремонтных составов малоэффективно, так как не решает проблему возникновения и развития дефектов и лишь временно маскирует проблемные участки. При этом восстановление несущей способности осуществляется без должного расчетного обоснования.

Таким образом, актуальна задача оценки несущей способности конструкций труб с учетом изменений условий эксплуатации, что станет основой для определения эффективных методов восстановления и защиты конструкций. Для решения поставленной цели планируются проведение численных расчетов несущей способности дымовых труб, ис-

<sup>6</sup> СТО 17230282.27.010.001–2007. Стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС РОССИИ» «Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния».

следование защитных составов и материалов для возможности футеровки внутренних поверхностей, оценка газоплотности элементов футеровки и трубы в целом.

Практическая значимость работы заключается в возможности оценки несущей способности и остаточного ресурса существующих железобетонных дымовых труб.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карабасов Ю.С., Черноусов П.И., Коротченко Н.А., Голубев О.В. *Металлургия и время* : энциклопедия. В 6 т. 2011–2014.

2. Степанов С.Г., Исламов С.Р. Газификация угля: возврат в прошлое или шаг в будущее? // *Новости теплоснабжения*. 2007. № 1 (77).

3. Бельский В.И., Сергеев Б.В. *Промышленные печи и трубы*. Издание второе. М. : Стройиздат, 1974. 301 с.

4. Зулкарнаев Г.С., Мелентьев А.С., Гафиятуллина Н.М. Конструктивные решения железобетонных промышленных газоотводящих труб // *Молодой ученый*. 2016. № 10 (114). С. 208–213. EDN WAOAZX.

5. Асташкин В.М., Жолудов В.С., Корсунский А.З., Малютин Е.В., Спорыхин Б.Б. *Дымовые трубы: традиции и инновации*. Глава 1. Классификация и основные элементы промышленных дымовых труб. 2011.

6. Асташкин В.М., Жолудов В.С., Корсунский А.З., Малютин Е.В., Спорыхин Б.Б. *Дымовые трубы: традиции и инновации*. Глава 2. Основы проектирования дымовых труб. 2011.

7. Коткова О.Н. Мониторинг безопасности дымовой трубы предприятия нефтехимии // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2013. № 3 (11). С. 81–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.16. EDN PYDCSJ.

8. Subbotin A., Razov I., Popova E., Dolgih A. Impact of the ash deposits from coal combustion on thermal conditions of the furnace pipes // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 110. P. 01068. DOI: 10.1051/mateconf/201711001068

9. Fakourian S., Roberts M., Dai J. Numerical prediction of ash deposit growth burning pure coal and its blends with woody biomass in a 1.5 MWh combustor // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 224. P. 120110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120110

10. Бабушкин Р.А., Гмызов Д.С., Иванов Ю.П. Тепловизионная диагностика дымовых труб // *Инновационная наука*. 2015. № 9 (9). С. 52–57. EDN UINXKZ.

11. Лазутин Н.В., Матвеев Ю.В. Тепловизионное обследование дымовой трубы — эффективный способ выявления скрытых дефектов в процессе

проведения экспертизы промышленной безопасности ее строительных конструкций // *Аспирант и соискатель*. 2015. № 6 (90). С. 87–89.

12. Kirchhof L.D., Antochaves de Lima R.C., da Silva Santos Neto A.B., Quispe A.C., da Silva Filho L.C.P. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures // *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2020. Vol. 25. Issue 1. DOI:10.1590/s1517-707620200001.0898

13. Ельшин А.М., Ижорин М.Н., Жолудов В.С., Овчаренко Е.Г. *Дымовые трубы: теория и практика конструирования и сооружения*. М. : Стройиздат, 2001. 295 с.

14. Mainier F.B., Fernandes Almeida P.C., Nani B., Fernandes L.H., Reis M.F. Corrosion caused by sulfur dioxide in reinforced concrete // *Open Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 5. Issue 4. Pp. 379–389. DOI: 10.4236/ojce.2015.54038

15. Jaśniok T., Jaśniok M. Influence of rapid changes of moisture content in concrete and temperature on corrosion rate of reinforcing steel // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 108. Pp. 316–323. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.153

16. Chernin L. Effect of corrosion on the concrete-reinforcement interaction in reinforced concrete beams. Haifa, 2008. 184 p.

17. Фадеева Г.Д., Гарькин И.Н., Забиоров А.И. *Промышленные железобетонные дымовые трубы: методика проведения экспертизы // Современная техника и технологии*. 2014. № 8 (36). С. 47–50. EDN SNLDYZ.

18. Дудочкин И.Б., Овчинников Я.В., Кухта М.В., Шишкина Е.А., Зарипова Г.У. *Технологии строительства дымовых промышленных труб // Технические науки — от теории к практике*. 2015. № 45. С. 93–99. EDN TRRTCP.

19. Slavcheva G., Bekker A.T. Temperature and humidity dependence on strength of high performance concrete // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. Pp. 524–528. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.265.524

20. Voland K., Weise F., Meng B. Alkali-silica reaction in concrete pavements // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 711. Pp. 714–721. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.714

Поступила в редакцию 3 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Валентин Алексеевич Ермаков** — кандидат технических наук, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Ermakov@mgsu.ru;

**Сергей Алексеевич Николаев** — аспирант кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; NikolaevS.A@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

Construction of the first industrial chimneys began in the 18th century. They were necessary for the functioning of blast furnaces used for iron smelting. The first blast furnace was built in 1709 according to the project of the English inventor Abraham Derby [1]. These furnaces and other manufacturing processes did not require high chimneys. Modernization was taking place in every industry, including manufacturing, which predisposed to the construction of taller chimneys than in those times. The main material for the construction of such structures were reinforced concrete structures<sup>1</sup>.

At present, a huge number of reinforced concrete chimneys are in operation in Russia, only in Moscow there are more than 35 such structures in operation at heat and power stations.

In order to provide cities with heat and electricity on a large scale and with the transition from cookers in homes to power generation enterprises, the construction of combined heat and power plants (CHP) was launched. No enterprise using in its list of fuel combustion equipment is without the construction of chimneys.

In the period 1950–1980, many old coal-fired CHP plants were closed or converted to natural gas (NG) combustion. This was due to the fact that NG is more efficient and environmentally friendly fuel, and coal reserves were beginning to be depleted [2]. Boilers were modernized from solid fuel [3] to gaseous fuel, but the question arose how the new fuel would interact with the structures of reinforced concrete chimneys and how it would affect the operation of all CHP.

## MATERIALS AND METHODS

A chimney is a vertically located structure that serves to discharge combustion products into the upper atmosphere. The principle of operation is based on the draught effect, which ensures the movement of gases along the entire length of the trunk from the inlet to the outlet of the chimney. The trunk of the chimney has a horizontal shape of round, oval or polygonal, and a vertical shape of cylinder or truncated cone. The height of industrial chimneys can reach several

hundred metres, for example, the highest chimney to date is 420 m, and it was erected in 1988 at Ekibastuzskaya GRES-2 (Kazakhstan) [4].

The most important part of a chimney is the reinforced concrete shell — the chimney shaft: single or multi-barrel. Single-barrel chimneys consist of the outer layer of the shell, whereas the multi-barrel construction implies a “pipe-in-pipe” device, in other words, several barrels from thermal units are constructed in the chimney with a ventilated space between them, in which the arrangement of platforms is assumed. The main advantage of the multi-bore pipe is the protection of the supporting reinforced concrete shaft from the aggressive environment of the discharged gases. The gas outlet shaft acts as a load-bearing structure and ensures the stability of the pipe under the influence of various environmental factors. Therefore, it is necessary to have the following initial data at the design stage, which will be fundamental for the construction of the facilities<sup>2</sup>:

1. Mode of operation of the pipe and characterization of the vented gases (composition, concentration, temperature, humidity, quantity and velocity of gases in the shaft, composition and quantity of dust particles, chemical composition and quantity of condensate).
2. Sketches of the cross-section of the gas ducts at the pipe inlet with the main dimensions.
3. Information on soils (geological sections of boreholes at least three boreholes 10–12 m deep, evenly located on the outer side of the foundation proposed for the pipe at a distance of not more than 5 m from the edge of the slab), possible acidification or alkalization of the soil during the pipe operation, groundwater position and its chemical composition.
4. Diagrams of foundations of adjacent structures and ground pressures beneath them.
5. Information on pipe height and mouth diameter.
6. For seismic areas, information on the maximum magnitude of earthquakes over the last 20 years.
7. For permafrost areas — the thickness and depth of active and permafrost ground.

The barrels of single-barrel reinforced concrete monolithic chimneys (Fig. 1) are truncated hollow

<sup>2</sup> Instruction on design of reinforced concrete chimneys. NIIZhB, Glavteplomontazh, All-Union Research and Design Institute «Teploproekt». 1962.

<sup>1</sup> CP 13-101–99. Rules for supervision, inspection, maintenance and repair of industrial chimneys and ventilation pipes.

cone, but with a variable slope of the outer surface from 8 to 1.5 % with decreasing height. It is recommended to make the upper part of the shaft cylindrical for 1/3 of the pipe height. The height of the barrel of reinforced concrete monolithic pipe has a variable thickness, and the minimum thickness in its upper part for reasons of durability and to ensure the possibility of quality compaction of the concrete mixture with a vibrator is accepted at the upper inner diameter up to 4.8 m not less than 160 mm; at a diameter of 4.8 to 7.2 m — not less than 180 mm; from 7.2 to 9 m — not less than 200 mm; over 9 m — not less than 250 mm [5].

The pipe barrel is divided by height into sections with constant wall thickness. The wall thickness of the barrel changes at the transition points from one section to another, as a rule, in the places where cantilevers are installed to support the lining or bearing structures of internal gas discharge barrels. Monolithic reinforced concrete pipe barrels are reinforced with vertical and horizontal reinforcement installed both at the outer and inner surfaces of the barrel wall. The cross-section of the reinforcement is determined by calculation. Periodic profile reinforcement is used for reinforcement. In old pipes, the reinforcement can be of smooth profile, with single row reinforcement only at the outer surface of the wall<sup>2</sup>.

The design of the chimney must contain calculations:

1. Calculation of strength and stability of reinforced concrete chimney.

The following factors are taken into account when calculating the strength and stability of chimneys:

- load from the pipe's own weight;
- wind load;
- temperature effects;
- seismic activity.

Strength and stability calculations are carried out using methods of structural mechanics and resistance of materials.

2. Calculation of the flue duct.

When designing chimneys, it is also necessary to perform the flue duct calculation, which includes the determination of the aerodynamic characteristics of the chimney, the selection of the optimum diameter and height of the chimney, as well as the calculation of pressure losses in the flue duct.

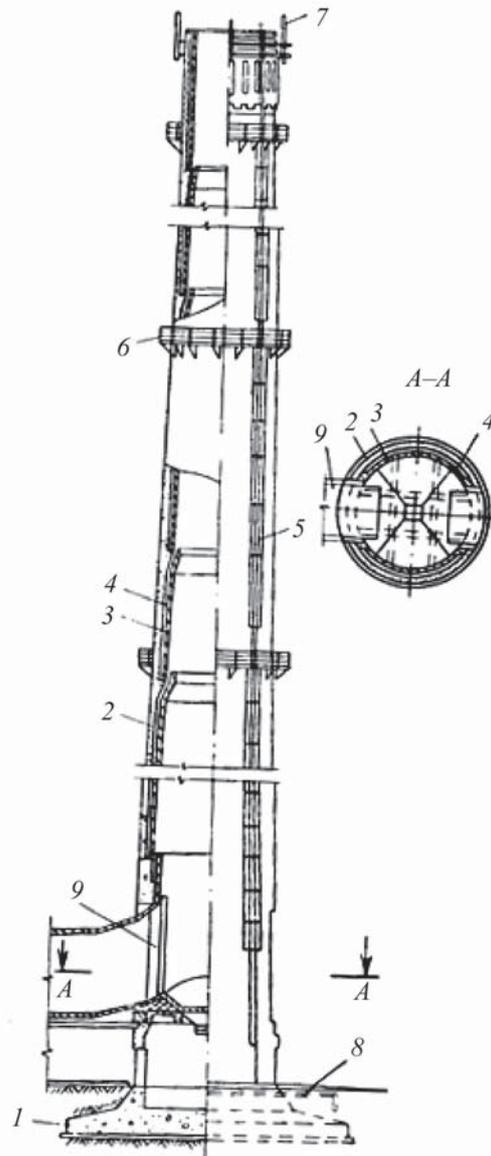
3. Calculation of corrosion resistance.

To ensure the durability of reinforced concrete chimneys, corrosion resistance should be calculated. Such factors as flue gas composition, temperature and humidity inside the chimney, presence of aggressive substances in flue gases, etc. are taken into account.

4. Calculation of thermal performance.

Thermal calculation of chimneys is carried out to determine the optimal parameters of thermal insulation and the choice of materials for its performance.

To protect the supporting shaft of the chimney from the temperature and aggressive influence of



**Fig. 1.** Scheme of reinforced concrete chimney: 1 — foundation; 2 — trunk; 3 — lining; 4 — thermal insulation; 5 — running ladder; 6 — traffic light platform; 7 — lightning rod; 8 — lightning rod grounding; 9 — gas duct inlet

the exhaust gases, where necessary, lining and thermal insulation of the shaft is used. Depending on the temperature and aggressiveness of the discharged gases, the lining should be made of fireclay, acid-resistant or clay ordinary bricks, special concrete, ceramics, steel, as well as plastics [6].

Brick linings are provided in links resting on cantilevered projections in the shaft. The height of the links should be no more than 25 m with a thickness of one brick and no more than 12.5 m with a thickness of 1/2 brick. In the area of openings for gas ducts, the thickness of lining should be increased to 1.5–2 bricks. By using special shaped sheet piling ceramics, the thickness of the lining can be reduced. The connection of the lower link to the overlying link must be designed

taking into account the growth of the lining (as a result of sulphating processes of the masonry joint material) and the thermal expansion of the lining material both in height and diameter<sup>3</sup>.

Inspection of reinforced concrete chimneys is a mandatory part of their operation. Monitoring of the condition of industrial structures allows timely detection of violations occurring in the structures during operation and their prompt elimination [7]. To assess the technical condition of chimneys the inspection includes<sup>1</sup>:

- 1) visual and measurement control;
- 2) thermal imaging;
- 3) geodetic control;
- 4) control of strength characteristics of structures;
- 5) calculations of building structures;
- 6) residual life assessment.

The main influencing factors on the load-bearing structure, namely the reinforced concrete shaft, are deposits from inside, otherwise ash deposits [8, 9], which in turn reduce the cross-section of the chimney and destruction from the inside of the chimney under the action of aggressive gases and the influence of exhaust flue gases from boiler units<sup>4</sup>.

Thus, with the switch to gaseous fuels, the present chimneys are not as designed, which has a significant impact on the reinforced concrete shaft.

These defects can be observed at the initial stages of their development. One of the ways of observation is thermal imaging (Fig. 2), where temperature shifts can be observed, which in turn confirms the reduction of gas tightness of the chimney lining [10, 11].

<sup>3</sup> CP 375.1325800.2017. Industrial flue pipes. Design rules.

<sup>4</sup> GD 34.20.328–95. Methods of inspection of chimneys of thermal power plants.

## RESEARCH RESULTS

According to the results of the survey, defects and damages of category “W” and “B”<sup>5</sup>, namely defects of the reinforced concrete shaft, have now become apparent:

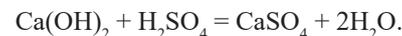
- of the destruction of the concrete protective layer;
- filtration of moisture through the concrete body;
- Bare and corrosive wear of bare fittings;
- the reverse slope of the cast iron chimney head;
- no protective coating on the lining.

These defects are caused by one of the following reasons.

During combustion of GHG, chemical reactions occur to oxidize the GHG components with oxygen. Reaction formula:

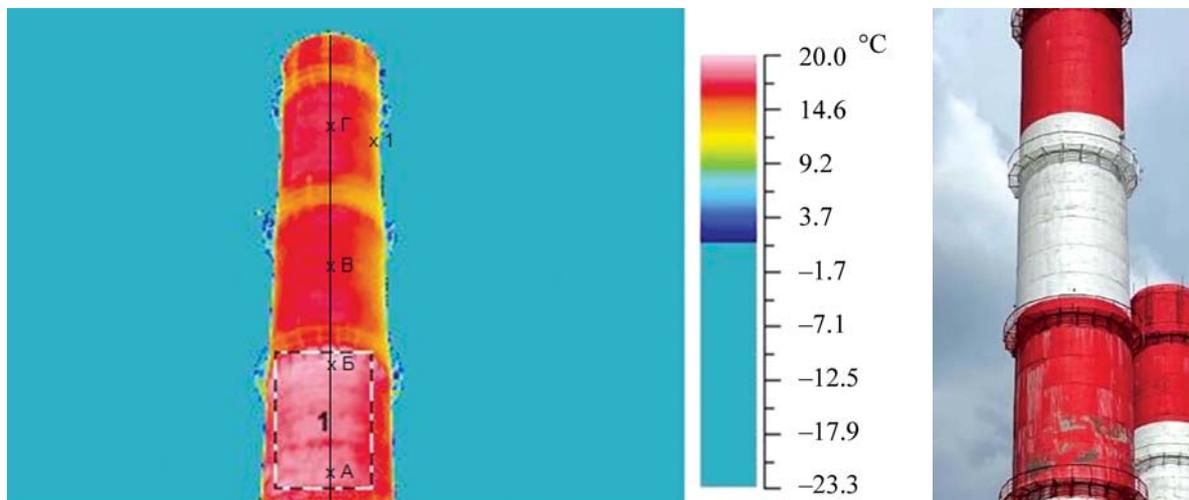


Hydrogen sulphide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) in GHGs can form sulphur compounds when the gas is burned in a CHP plant. Sulphur present in GHG can form sulphur oxides during combustion, such as sulphur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) and sulphur trioxide ( $\text{SO}_3$ ). If a “dew point” forms in the pipe, condensation of the gaseous waste begins. Condensate without impurities of acids and sulphates causes corrosion of the material of the first kind — leaching of free lime from the cement stone of concretes and mortars [12]. In the presence of sulphur acid in the condensate, corrosion of the second kind occurs — acid destruction of cement stone in concrete and mortars and bricks in masonry. The reaction is expressed by the formula [13, 14]:



As water vapour is present in the pipe, sulphur compounds give sulphur acid with it. The formation

<sup>5</sup> OS 17230282.27.010.001–2007. Standard of the Organization of RAO UES of RUSSIA, JSC “Buildings and structures of power engineering facilities. Methodology of technical condition assessment”..



**Fig. 2.** The result of thermal imaging of the reinforced concrete chimney with the height  $h = 120,0$  m, where the temperature shift  $\Delta t \geq 9.0$  °C can be traced, indicating the violation of gas tightness of the lining and the destruction of the protective layer of concrete

of such aggressive condensate is very dangerous for the chimney. If there is a strong temperature difference between the outside air and flue gases inside the pipe, moisture migration starts: penetrating into the reinforced concrete shaft, acid starts to corrode the reinforcement and stone [14, 15]. The cracks that appear as a result of reinforcement corrosion (opening width up to 0.05 mm) do not pose an immediate danger of failure, but they contribute to accelerating the destruction of reinforced concrete [16]. On the outer surface of pipes, sometimes one can see whitish spots (Fig. 4) — this is the condensate penetrating through the lining and the shaft [17]. In winter, such moisture turns into ice [18, 19]. The formed condensate occurs on the inner surface of the chimney shaft, namely on the liner cantilevers (Fig. 3), this is caused by the transition of CHP from solid fuel (coal) combustion to GHG as the main fuel, as well as by the reduction of actual operating modes.

The condensate formed leads to the process of moisture filtration through the concrete body, accompanied by leaching of free lime along the weakened sections, reducing the values of concrete strength (Table, Fig. 4), as well as corrosion of reinforcement [13, 15, 20].

These defects indicate a violation of gas tightness of the chimney, which in turn may, in case of damage development, go to the category “A”<sup>6</sup> and lead to an emergency condition of the chimney as a whole.

Thus, at this point in time, with the transition from solid to gaseous fuel, defects have occurred on the reinforced concrete shafts of the chimney. The operating conditions of the chimney do not correspond to the design of the structure according to the project. The current methods of defect elimination only eliminate the consequences of already formed defects on the gas discharge shafts, but do not eliminate the causes of defects. In the places of formed defects of the rein-

<sup>6</sup> OS 17230282.27.010.001-2007. Standard of the Organization of RAO UES of RUSSIA, JSC “Buildings and structures of power engineering facilities. Methodology of technical condition assessment”.

forced concrete shaft, the application of a repair compound having a good level of adhesion with concrete is used, masking the destruction of the chimney shell. As a rule, the repair compounds applied to the material have a water resistance grade higher than that of the concrete used in the construction of chimneys, thus

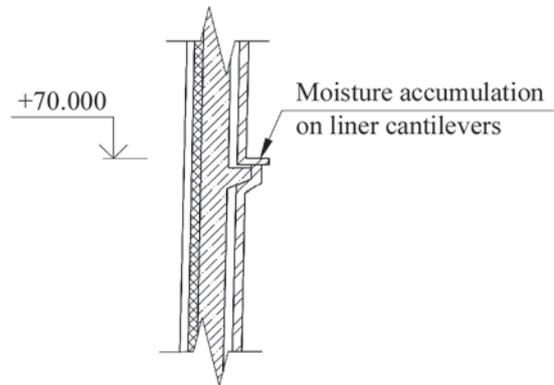


Fig. 3. Lining cantilevers where condensate accumulates abundantly at an average chimney height of 120.0 m from the ground surface and a mouth diameter of 7.0 m



Fig. 4. Leaching process of free lime through weakened concrete sections

Results of measurements of actual concrete strength at different heights of the chimney with height  $h = 120.0$  m

Level mark	Design class (grade) of concrete of reinforced concrete cage $R$	Strength value at sections $R_s$ , MPa	Compliance with the actual concrete class
+1.800	M300	28.9	B22.5 (M300)
+15.500	M300	29.1	B22.5 (M300)
+38.500	M300	32.0	B22.5 (M300)
+53.500	M300	23.9	B15 (M200)
+68.500	M300	09.5	B7.5 (M100)
+83.500	M300	09.3	B5 (M75)
+95.500	M300	22.5	B15 (M200)
+100.000	M300	25.9	B20 (M250)
+113.000	M300	14.3	B10 (M150)

moisture begins to penetrate the perimeter of the application of the repair compound. Over time, the weakened concrete collapses together with the applied repair compound, which multiplies the area of damage.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

One of the most important elements of CHP are chimneys designed for the removal of combustion products from boiler units. Reinforced concrete chimneys are the most widespread. From 1960 to 1980, the majority of CHP was reoriented to combustion of GHG instead of solid fuel (coal). At the same time, boiler units were modernized, while chimney structures remained in their original state. The change of fuel type led not only to changes in the chemical composition of flue gases, but also to adjustments in the operation mode of boiler units, which affected the frequency and magnitude of the impact of gases on the supporting structures of the chimney.

The results of inspections of reinforced concrete chimneys operating under conditions of GHG combustion show that the residual life is rapidly decreasing due to accelerated development of defects and damages of structures, according to the experience of the conducted inspections it was not observed in chimneys under solid fuel combustion. There is an actual decrease in gas tightness of the lining and increased condensate accumulation on the flue pipe cantilevers due to uneven

supply of flue gases from boiler units. The formed condensate leads to leaching of free lime in the weakened sections of the structure and corrosion of reinforcement due to moisture filtration through the concrete body.

Currently, high-strength repair compounds are mainly used to restore the bearing capacity of reinforced concrete shafts. As a result, there is a risk of the repair compound separating into a single mass with concrete fragments, which, if it falls, may result in injury to personnel, damage to technical equipment and neighbouring structures. The use of repair compositions is ineffective as it does not solve the problem of defects occurrence and development and only temporarily masks the problem areas. At the same time, the load-bearing capacity is restored without proper calculation justification.

Thus, the task of estimating the load-bearing capacity of chimney structures taking into account changes in operating conditions is relevant, which will be the basis for determining effective methods of restoration and protection of structures. To solve the set goal, it is planned to carry out numerical calculations of the bearing capacity of chimneys, to study protective compositions and materials for the possibility of lining internal surfaces, to assess the gas density of lining elements and the chimney as a whole.

The practical significance of the work lies in the possibility of assessing the bearing capacity and residual life of existing reinforced concrete chimneys.

## REFERENCES

1. Karabasov Yu.S., Chernousov P.I., Korotchenko N.A., Golubev O.V. *Metallurgy and time: encyclopedia*. In 6 volumes. 2011-2014. (rus.).
2. Stepanov S.G., Islamov S.R. Coal gasification: a return to the past or a step into the future? *Heat Supply News*. 2007; 1(77). (rus.).
3. Belsky V.I., Sergeev B.V. *Industrial furnaces and pipes. Second edition*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 301. (rus.).
4. Zulkarnaev G.S., Melentyev A.S., Gafiyatulina N.M. Structural solutions for reinforced concrete industrial gas exhaust pipes. *Young Scientist*. 2016; 10(114):208-213. EDN WAOAZX. (rus.).
5. Astashkin V.M., Zholudov V.S., Korsunsky A.Z., Malyutin E.V., Sporykhin B.B. *Chimneys: traditions and innovations. Chapter 1. Classification and main elements of industrial chimneys*. 2011. (rus.).
6. Astashkin V.M., Zholudov V.S., Korsunsky A.Z., Malyutin E.V., Sporykhin B.B. *Chimneys: traditions and innovations. Chapter 2. Basics of chimney design*. 2011. (rus.).
7. Kotkova O.N. Safety monitoring of smoke stacks petrochemical company. *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*. 2013; 3(11):81-84. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.16. EDN PYDCSJ. (rus.).
8. Subbotin A., Razov I., Popova E., Dolgih A. Impact of the ash deposits from coal combustion on thermal conditions of the furnace pipes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 110:01068. DOI: 10.1051/matec-conf/201711001068
9. Fakourian S., Roberts M., Dai J. Numerical prediction of ash deposit growth burning pure coal and its blends with woody biomass in a 1.5 MWTH combustor. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 224:120110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120110
10. Babushkin R.A., Gmyzov D.S., Iva-nov Yu.P. Thermal imaging diagnostics of chimneys. *Innovation Science*. 2015; 9(9):52-57. EDN UINXKZ. (rus.).
11. Lazutin N.V., Matveev Yu.V. Thermal imaging inspection of a chimney is an effective way to identify hidden defects in the process of conducting an industrial safety examination of its building structures. *Graduate Student and Applicant*. 2015; 6(90):87-89. (rus.).
12. Kirchhof L.D., Antochaves de Lima R.C., da Silva Santos Neto A.B., Quispe A.C., da Silva Filho L.C.P. Effect of Moisture Content on the Behavior

of High Strength Concrete at High Temperatures. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2020; 25(1). DOI:10.1590/s1517-707620200001.0898

13. Elshin A.M., Izhorin M.N., Zholudov V.S., Ovcharenko E.G. *Smoke pipes. Theory and practice of design and construction*. Moscow, Stroyizdat, 2001; 295. (rus.).

14. Mainier F.B., Fernandes Almeida P.C., Nani B., Fernandes L.H., Reis M.F. Corrosion caused by sulfur dioxide in reinforced concrete. *Open Journal of Civil Engineering*. 2015; 5(4):379-389. DOI: 10.4236/ojce.2015.54038

15. Jaśniok T., Jaśniok M. Influence of rapid changes of moisture content in concrete and temperature on corrosion rate of reinforcing steel. *Procedia Engineering*. 2015; 108:316-323. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.153

16. Chernin L. *Effect of corrosion on the concrete-reinforcement interaction in reinforced concrete beams*. Haifa, 2008; 184.

17. Fadeeva G.D., Garkin I.N., Zabiroy A.I. Industrial reinforced concrete chimneys: methods of examination. *Modern Technics and Technologies*. 2014; 8(36):47-50. EDN SNLDYZ. (rus.).

18. Dudochkin I., Ovchinnikov Ya., Kuhta M., Shishkina E., Zaripova G. Construction methods of industrial chimney. *Technical sciences — from theory to practice*. 2015; 45:93-99. EDN TRRTCP. (rus.).

19. Slavcheva G., Bekker A.T. Temperature and humidity dependence on strength of high performance concrete. *Solid State Phenomena*. 2017; 265:524-528. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.265.524

20. Voland K., Weise F., Meng B. Alkali-silica reaction in concrete pavements. *Key Engineering Materials*. 2016; 711:714-721. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.714

Received May 3, 2024.

Adopted in revised form on May 28, 2024.

Approved for publication on May 28, 2024.

**B I O N O T E S:** **Valentin A. Ermakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Ermakov@mgsu.ru;

**Sergey A. Nikolaev** — postgraduate student of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; NikolaevS.A@yandex.ru.

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.*

*The authors declare that there is no conflict of interests.*