

УДК 621.311.22:697.8

## Расчетные исследования режимов работы кирпичных дымовых труб в условиях эксплуатации

В.В. Варнашов<sup>1</sup>, А.А. Киселев<sup>2</sup>, В.С. Гребнов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО Научно-производственная коммерческая фирма «ЭЛВЕСТ», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО Научно-технический центр «Система», г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: viktor.varnashov@yandex.ru; kaa\_alp@mail.ru; system37@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время на объектах теплоэнергетики и отопительных котельных эксплуатируется значительное количество дымовых труб, в том числе кирпичных. От надежной и безопасной работы дымовых труб зависит бесперебойное снабжение потребителей электрической и тепловой энергией. В процессе эксплуатации ограждающие конструкции дымовых труб подвержены разрушению от различных факторов. К таким факторам можно отнести высокий температурный перепад на стенке ствола, приводящий к трещинообразованию, нарушение температурно-влажностного режима ограждений, приводящее к увлажнению конструкций и последующему снижению их прочностных характеристик. В публикациях, посвященных вопросам эксплуатации дымовых труб, дан общий анализ причин, приводящих к возникновению разрушений конструкций дымовых труб. Однако анализ причин, приводящих к разрушениям строительных конструкций дымовых труб в реальных условиях эксплуатации, и практические рекомендации по их устранению отсутствуют. В связи с этим выявление условий, при которых возникают факторы, приводящие к разрушению строительных конструкций дымовых труб в реальных условиях эксплуатации, а также разработка рекомендаций по устранению причин разрушений строительных конструкций являются весьма актуальной задачей.

**Материалы и методы:** Натурные и расчетные исследования теплоаэродинамических и влажностных режимов ограждающих конструкций кирпичных дымовых труб проведены с использованием разработанных математических моделей и программных средств.

**Результаты:** Результаты натурных обследований и вариантных расчетов показали, что причиной разрушений ограждающих конструкций дымовых труб с прижимной футеровкой является несоответствие конструкции ограждений труб режимам эксплуатации котельных агрегатов. Разработаны рекомендации по изменению конструкции ограждений существующих дымовых труб, направленных на устранение причин нарушения влажностного режима и, как следствие, дальнейшего разрушения ограждающих конструкций. Практическое применение разработанных рекомендаций при выполнении ремонта эксплуатируемых кирпичных дымовых труб ряда отопительных котельных Ивановской области подтвердило их эффективность.

**Выводы:** Полученные результаты можно использовать при проведении ремонтов существующих и строительстве новых кирпичных дымовых труб.

**Ключевые слова:** дымовая труба, ограждающие конструкции, влажностный режим, факторы разрушения, повышение надежности работы.

## A study of operation modes of brick chimneys in operation

V.V. Varnashov<sup>1</sup>, K.A. Kiselyov<sup>2</sup>, V.S. Grebnov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО Research and Production Company «ELVEST», Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>3</sup> ООО Research and Production Company «Systema», Ivanovo, Russian Federation

E-mail: viktor.varnashov@yandex.ru; kaa\_alp@mail.ru; system37@mail.ru

### Abstract

**Background:** Power facilities and heating plants currently operate a lot of chimney stacks including those made of brick. The reliability and safety of their operation ensures the uninterrupted supply of electric and thermal energy to consumers. The chimney walling is subject to degradation due to different factors including the high thermal gradient of the barrel wall resulting in cracking, violation of the temperature and humidity conditions of the walling, which leads to the structures humidification and subsequent reduction of their strength. Publications devoted to the operation of chimneys give a general overview of the causes of chimney destruction but do not touch upon its reasons in real operating conditions and do not contain practical recommendations of how to eliminate these factors. Therefore, it is quite urgent to detect conditions promoting the factors leading to chimney stack destruction in real operating conditions and to develop recommendations of how to eliminate its causes.

**Materials and methods:** The field and computational studies of thermoaerodynamic and humidity conditions of brick chimney stack walling were conducted with the use of the developed mathematical models and software tools.

**Results:** The results of field surveys and variants calculations showed that the destruction of chimney stack walling with pressure lining was caused by nonconformity of the chimney walling construction with the boiler unit operation modes. Recommendations were developed for changing chimney stack walling in order to eliminate the reasons for humidity

condition violation and the subsequent walling structure destruction. Application of the developed recommendations in repairing brick chimney stacks in operation at a number of boiler plants of Ivanovo region confirmed their effectiveness.

**Conclusions:** The obtained results can be used to repair brick chimneys in operation and to construct new ones.

**Key words:** chimney, walling, humidity conditions, destruction factors, operation reliability increase.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2016.1.018-026

Дымовые трубы являются конечными элементами газоотводящих трактов котельных агрегатов тепловых электрических станций (ТЭС) и отопительно-производственных котельных жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

От надежной и безопасной работы дымовых труб зависит бесперебойное снабжение потребителей электрической и тепловой энергией.

Современная Российская теплоэнергетика и котельные ЖКХ характеризуются наличием значительного количества построенных и эксплуатируемых дымовых труб, в том числе и кирпичных.

В настоящее время в России эксплуатируется более 100 тысяч кирпичных дымовых труб. Кирпичные дымовые трубы сооружены в основном на отопительно-производственных котельных. Высота таких труб обычно не превышает 120 м. Однако в целях соблюдения требований по чистоте атмосферного воздуха в районе расположения мощных ТЭС возникла необходимость строительства более высоких дымовых труб (до 330 м) для эффективного рассеивания вредных выбросов в атмосфере.

Строительство кирпичных дымовых труб производилось в основном по типовым проектам, которые были разработаны проектным институтом ВНИПИ «Теплопроект», значительное их количество было сооружено в 1950–1970-е гг., и в настоящее время они продолжают эксплуатироваться.

Использование в качестве строительного материала красного глиняного кирпича для сооружения дымовых труб было связано с его доступностью и незначительной стоимостью по сравнению, например, с металлом или пластиком.

Здания и сооружения на опасных производственных объектах, к которым относятся ТЭС и котельные ЖКХ, предназначенные для осуществления технологических процессов, подлежат экспертизе промышленной безопасности.

При проведении экспертизы промышленной безопасности промышленных дымовых и вентиляционных труб на опасных производственных объектах часто приходится сталкиваться со значительными разрушениями кирпичной кладки несущего ствола дымовой трубы.

Выявление причин разрушений ствола дымовой трубы возможно при проведении расчетных исследований теплоаэродинамических и влажностных режимов ограждающих конструкций в зависимости от режимов работы подключенных к ним котельных агрегатов, вида сжигаемого топлива и климатических условий.

В [1–7] дан общий анализ причин, приводящих к появлению разрушений несущих конструкций дымовых труб при эксплуатации. Однако расчетных исследований, подтверждающих возникновение причин разрушений, и практических рекомендаций по их устранению не приведено.

В [8] приведен расчетный анализ работы дымовой трубы с кирпичной футеровкой в условиях эксплуатации, выявлены причины возникновения разрушений и даны рекомендации по повышению надежности работы дымовой трубы путем ее реконструкции с заменой кирпичного газоотводящего ствола на металлический. Однако такой способ продления ресурса трубы является дорогостоящим и не всегда приемлем по экономическим соображениям.

Котельные, построенные в 1950–1970-е гг., в основном работали на твердом и жидком (мазуте) топливе. При этом особых проблем с надежностью работы кирпичных дымовых труб не возникало, поскольку температура уходящих газов за котельными агрегатами составляла 180–250 °С.

Перевод большинства котельных агрегатов на сжигание природного газа, а также стремлением повысить экономичность котельных агрегатов за счет понижения температуры дымовых газов привели к тому, что ограждающие конструкции кирпичных дымовых труб начали интенсивно разрушаться в виде отслоения наружной поверхности несущего ствола лещадками.

Как известно [9], природный газ в своем составе содержит в основном метан (до 98 %  $\text{CH}_4$ ). При его сжигании в котельных агрегатах с избытком воздуха  $\alpha = 1,2\text{--}2,0$  образуется значительное количество водяных паров (до 16–11 % по объему), которые вместе с уходящими газами поступают во внешние газоходы и дымовые трубы.

Изменение режимов эксплуатации котельных агрегатов (снижение тепловой нагрузки котлов, низкая температура наружного воздуха, увеличение присосов воздуха по газовому тракту котельного агрегата) приводит к изменению температурно-влажностного режима работы ограждающих конструкций кирпичных дымовых труб.

При понижении температуры и расхода дымовых газов за котельными агрегатами на внутренних стенках трубы, соприкасающихся с дымовыми газами, когда температура их становится ниже температуры «точки росы» дымовых газов, содержащиеся в дымовых газах водяные пары будут конденсироваться.

Увлажнение стенок ствола приводит к снижению их прочностных характеристик и несущей способности строительных конструкций дымовой трубы.

Известно, что если температура внутренних стенок будет выше температуры «точки росы», то условия образования конденсата водяных паров на внутренних стенках трубы отсутствуют. Несмотря на это, образование конденсата может происходить внутри строительных конструкций.

Как известно [9], материалы ограждающих конструкций кирпичных дымовых труб являются паропроницаемыми. Механизм диффузии водяных паров через паропроницаемые ограждения связан с разностью их парциальных давлений внутри и снаружи конструкции независимо от наличия или отсутствия избыточного статического давления газов в трубе.

В слоях ограждений с пониженной температурой может возникнуть зона, в которой действительная упругость (парциальное давление) водяных паров становится выше максимальной упругости при данной температуре в слое. В этом случае происходит конденсация части влаги, мигрирующей через ограждения наружу трубы. Превышение количества влаги в зоне конденсации над влагой, покинувшей эту зону, приводит к ее накоплению внутри конструкции трубы.

При отрицательных температурах в слоях ограждений скопившаяся влага замерзает и, расширяясь, приводит к возникновению разрушающих усилий в кирпичной кладке несущего ствола.

Кирпичные дымовые трубы по конструкции состоят из несущего ствола и футеровки, которая устанавливается внутри трубы на консолях ствола с образованием воздушных невентилируемых зазоров (рис. 1, а) или с теплоизоляцией (рис. 1, б).

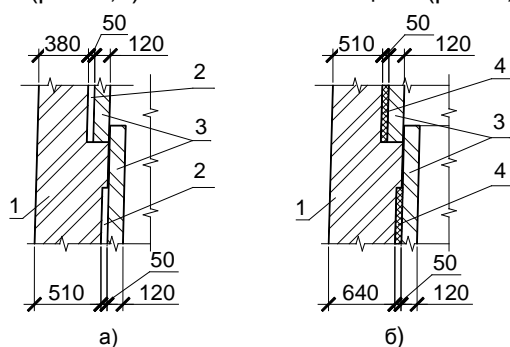


Рис. 1. Конструкция сопряжения звеньев футеровки кирпичной дымовой трубы с воздушным зазором (а) и с тепловой изоляцией (б): 1 – несущий ствол; 2 – воздушный зазор; 3 – футеровка; 4 – теплоизоляция

При экспертизе промышленной безопасности проводится анализ влияния тепловлажностного состояния ограждающих конструкций дымовой трубы на надежность ее работы в условиях фактических режимов эксплуатации подключенных котельных агрегатов.

Температурно-влажностный режим ограждений кирпичной дымовой трубы выявляется по результатам теплоаэродинамических и влажностных расчетов.

Определение параметров ограждающих конструкций по сечениям и высоте дымовой трубы (температура на границах слоев, парциаль-

ные давления водяных паров, изменение статических давлений и скорость газов в трубе, количество влаги в ограждениях) связано с выполнением значительного количества математических вычислений, что при ручном счете является весьма трудоемкой операцией и занимает значительное расчетное время даже при расчете только одного режима эксплуатации трубы.

Современная вычислительная техника при наличии математического аппарата и программных комплексов позволяет значительно сократить время вычислительных процессов.

В этом случае анализ и выбор оптимальных режимов эксплуатации или конструктивного решения дымовой трубы, удовлетворяющих ее надежности при эксплуатации, по времени значительно сокращаются.

На основании многолетних исследований газоотводящих трактов котельных агрегатов были разработаны математическая модель [10] и прикладная компьютерная программа для ЭВМ [11] по расчету теплоаэродинамических, влажностных и коррозионных режимов дымовых труб с прижимной футеровкой.

Алгоритм построения температурных полей по высоте трубы основывается на интервально-итерационном методе, при котором расчет производится последовательно по участкам, а внутри каждого из них расчет теплопередачи производится методом последовательных приближений на основе решения уравнений теплового баланса и тепломассопереноса [12].

Конечные параметры предыдущего участка являются начальными параметрами последующего участка дымовой трубы. Разбивая дымовую трубу по высоте на несколько расчетных участков, получаем изменение всех параметров как по высоте, так и по сечениям трубы.

Результатами теплотехнического расчета являются изменения температуры по высоте трубы уходящих газов, внутренней стенки футеровки и ствола, температурных перепадов в футеровке и стволе.

Одновременно с теплотехническим производится и аэродинамический расчет, который заключается в определении статических давлений газов с учетом влияния самотяги в дымовой трубе и аэродинамического сопротивления тракта.

На основании теплотехнического и аэродинамического расчетов выполняется расчет влажностных режимов работы ограждающих конструкций дымовой трубы.

Как было сказано выше, конденсация влаги на поверхности трубы, соприкасающейся с дымовыми газами, возникает при снижении температуры стенок ниже температуры «точки росы» уходящих газов, и ее наличие легко прогнозируется по результатам теплотехнического расчета.

Особенно опасно наличие конденсации влаги при сжигании высокосернистых топлив (мазут, каменный и бурый уголь, горючий сланец), так как это сопровождается образованием

серной кислоты и последующей низкотемпературной коррозией элементов дымовой трубы.

В зимних условиях при возможных остановках котлов скопившаяся в толще ограждений влага замерзает и, расширяясь, приводит к дополнительным разрушениям.

Анализ режимов работы кирпичных дымовых труб в реальных условиях эксплуатации выполнен с использованием вышеназванной программы для ЭВМ.

Ниже приведены результаты теплоаэродинамического расчета типовой конструкции кирпичной дымовой трубы высотой  $H = 67,5$  м и внутренним диаметром устья  $3,81$  м (рис. 2), отводящей продукты сгорания природного газа от котлов одной из отопительно-производственных котельных.

Исходные данные для расчетов дымовой трубы приведены в таблице.

**Исходные данные для расчета кирпичной дымовой трубы высотой  $H = 67,5$  м**

Наименование параметра	Ед. изм.	Режим работы		
		зима	осень	лето
Нагрузка котлов	т/ч	50	25	10
Расход уходящих газов	м <sup>3</sup> /с	25,1	15,8	4,4
Температура уходящих газов	°С	185	174	145
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	-	1,3	1,35	1,6
Температура «точки росы» уходящих газов	°С	55,1	54,4	51,5

К дымовой трубе подключены пять паровых котлов типа ДКВр-20-13 суммарной производительностью 100 т/ч. Фактическая нагрузка подключенных к трубе паровых котлов составляет 40–50 т/ч в зимний период эксплуатации и 10–25 т/ч в осенне-весенний и летний периоды эксплуатации.

Результаты теплоаэродинамических расчетов ограждающих конструкций дымовой трубы (рис. 2) приведены на рис. 3–7 в виде графиков изменения температурных и аэродинамических параметров по высоте дымовой трубы.

Расчеты показывают, что температура внутренней стенки футеровки и несущего ствола по высоте трубы (рис. 4), непосредственно соприкасающихся с дымовыми газами, при всех режимах работы подключенных к трубе котлов находится выше температуры «точки росы» (см. таблицу). Это свидетельствует о том, что конденсат на внутренних стенках трубы не образуется.

В целях оценки температурно-влажностного режима работы ограждающих конструкций по сечениям трубы в методике расчета предусмотрено определение возможности выпадения конденсата водяных паров внутри ограждающих конструкций трубы и его накопления.

Максимальная упругость водяных паров (парциальное давление) определяется на основании расчета температурных полей в сечениях

трубы. Изменение действительной упругости водяных паров связано с характеристиками паропроницаемости материалов, из которых выполнены ограждающие конструкции дымовой трубы.

Для установившегося теплового состояния, когда тепловой поток через стенку постоянный, используется графоаналитический метод [10] определения зоны возможной конденсации водяных паров в ограждениях дымовой трубы, основанный на определении координат в слоях ограждений, где возможно пересечение линий максимальной и действительной упругости водяных паров.

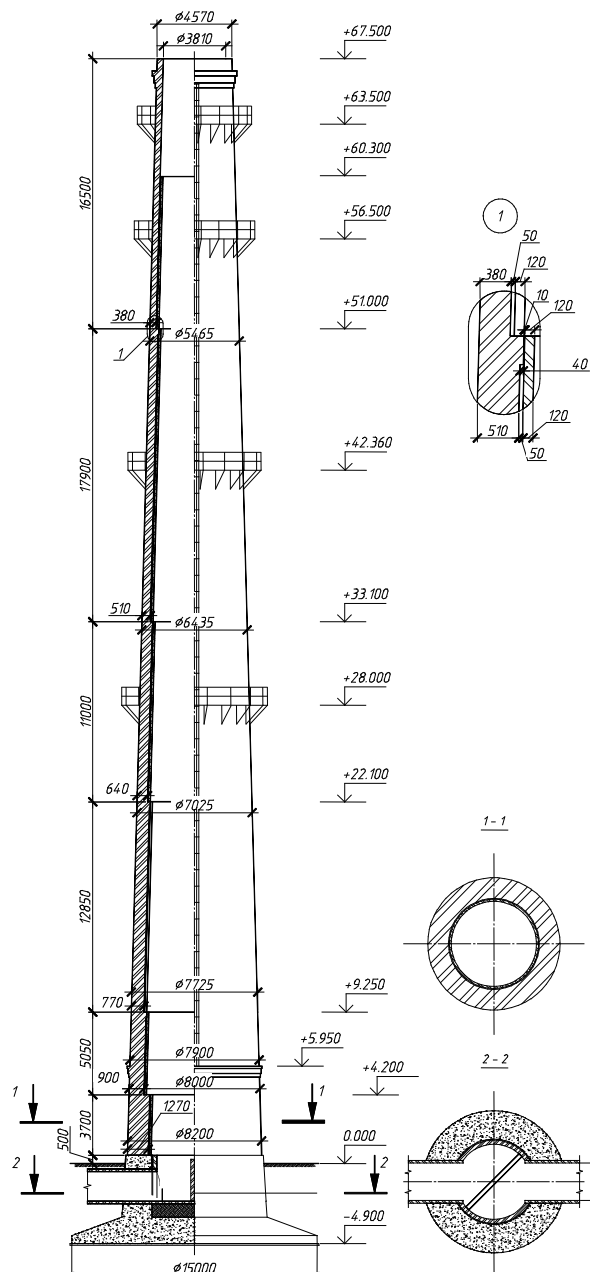


Рис. 2. Общий вид и разрезы кирпичной дымовой трубы высотой  $H = 67,5$  м и внутренним диаметром устья  $3,81$  м

Значение максимальной упругости водяных паров  $e_m$  (мм рт. ст.) определяется в зависимости от температуры в слое ограждения ( $T_b$ , °С) по аппроксимированной полиномиальной формуле [11]:

$$e_M = 2 \cdot 10^{-8} T_i^5 + 2 \cdot 10^{-6} T_i^4 + 2 \cdot 10^{-4} T_i^3 + 1,08 \cdot 10^{-2} T_i^2 + 0,3326 T_i + 4,58. \quad (1)$$

По аналогии с распределением температурных полей по сечению ограждающих конструкций дымовой трубы [13], значения действительных парциальных давлений водяных паров в сечениях трубы определяются по следующей формуле [10]:

$$e_n = e_v - \frac{\Delta e}{\sum R_n} \sum R_{n(n-1)}, \quad (2)$$

где  $e_v$  – упругость (парциальное давление) водяных паров с внутренней стороны ограждения дымовой трубы (в дымовых газах), мм рт.ст.;  $\Delta e$  – разность парциальных давлений водяного пара между внутренней средой и наружным воздухом, мм рт.ст.;  $\sum R_n = \frac{\delta}{\mu}$  – общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ )/мг;  $\sum R_{n(n-1)}$  – сопротивление паропроницанию внутренних конструктивных слоев ограждения дымовой трубы, расположенных между потоком дымовых газов и плоскостью, в которой вычисляется значение парциального давления, ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ )/мг;  $\delta$  – толщина слоя ограждающей конструкции, м;  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

На рис. 8 приведена графическая иллюстрация влажностного режима двух вариантов ограждающих конструкций вышеприведенной дымовой трубы на отметке +60,000 м для зимнего режима эксплуатации.

Результаты влажностного расчета дымовой трубы показывают, что при известной конструкции трубы (рис. 1) и низкой температуре наружного воздуха в толще несущего ствола всегда будет происходить процесс конденсации водяных паров (рис. 8) независимо от нагрузки подключенных к трубе котельных агрегатов.

При этом для конструкции с тепловой изоляцией между футеровкой и стволом зона возможной конденсации водяных паров в толще ствола расположена практически по всей его толщине (рис. 8,б).

В связи с тем, что температурное поле по сечению трубы существенно зависит от температуры уходящих газов и наружного воздуха, т. е. носит сезонный характер, накопление влаги в толще несущего ствола дымовой трубы также зависит от температурных условий эксплуатации.

В летний период, когда дымовая труба не работает, влага, накопившаяся в толще конструкций, частично диффундирует наружу в атмосферный воздух. В зимний период, наоборот, происходит накопление влаги в толще конструкций дымовой трубы.

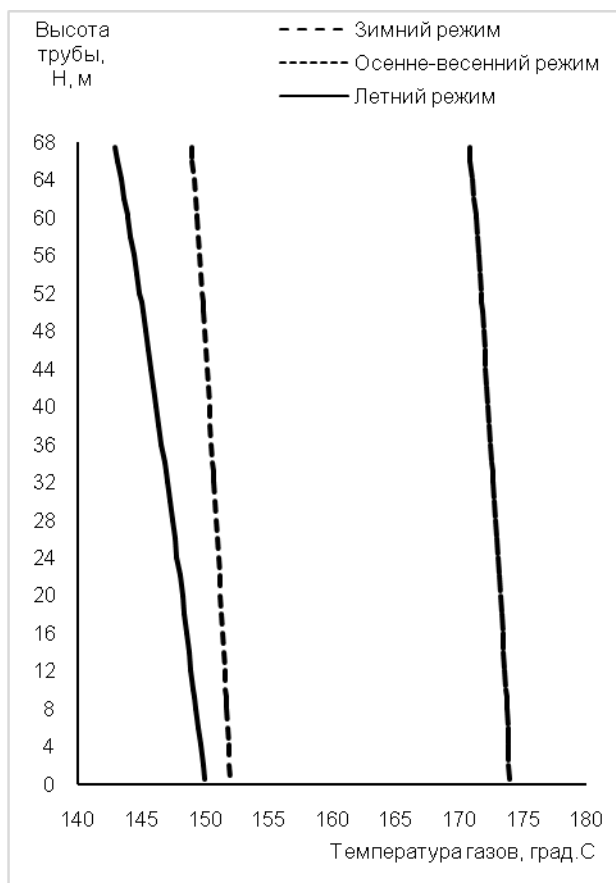


Рис. 3. Изменение температуры уходящих газов по высоте дымовой трубы в зависимости от режимов работы котлов

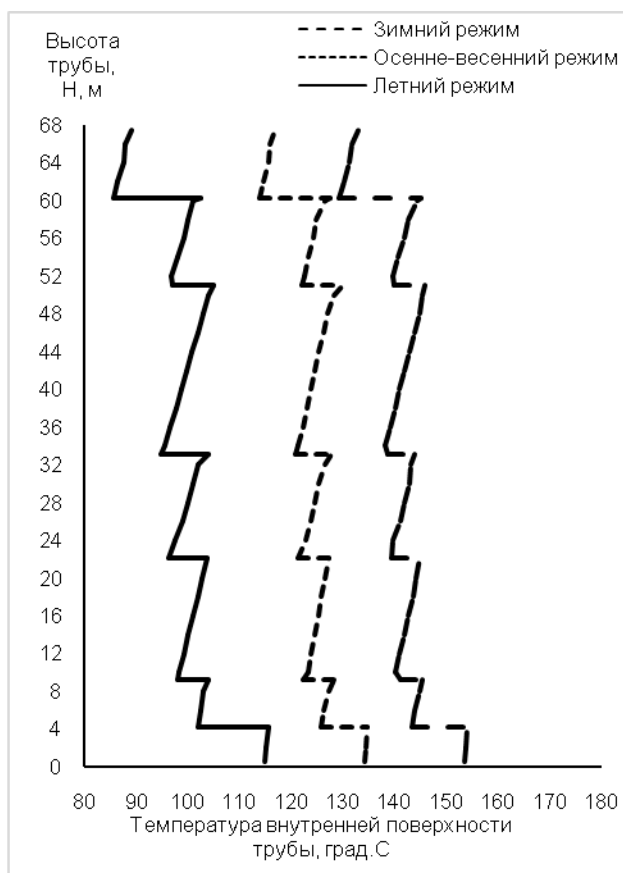


Рис. 4. Изменение температуры внутренней поверхности ствола по высоте дымовой трубы в зависимости от режимов работы котлов

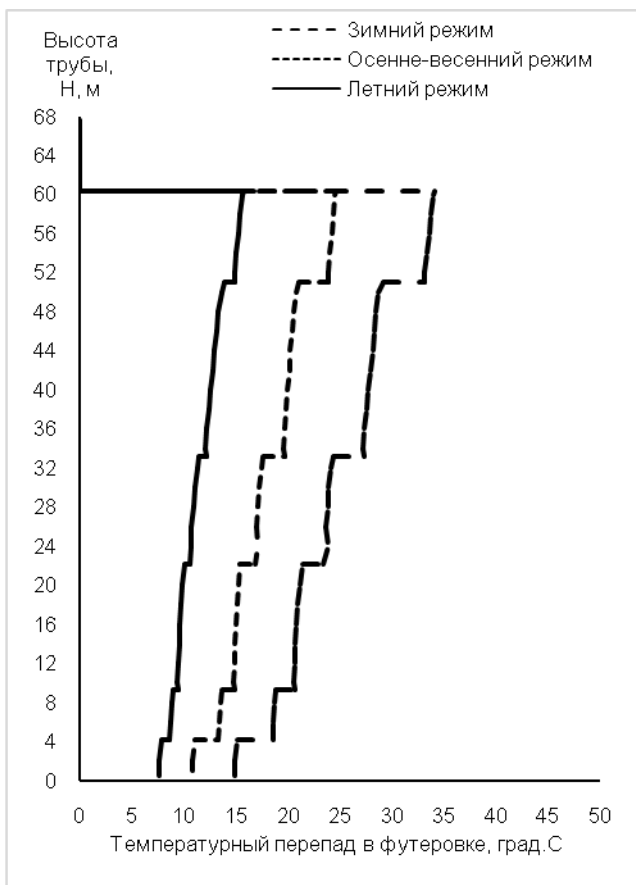


Рис. 5. Изменение температурного перепада в футеровке по высоте дымовой трубы в зависимости от режимов работы котлов

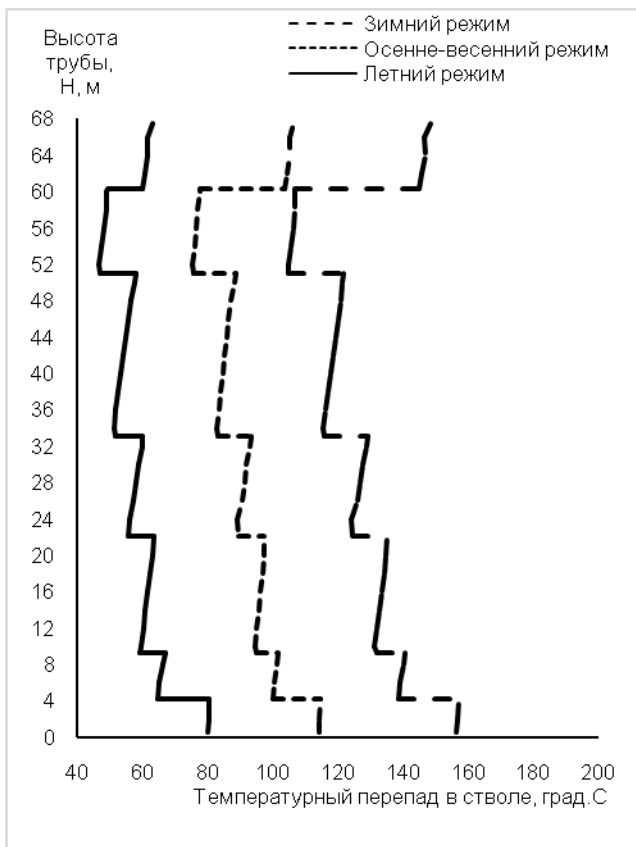


Рис. 6. Изменение температурного перепада в несущем стволе по высоте дымовой трубы в зависимости от режимов работы котлов

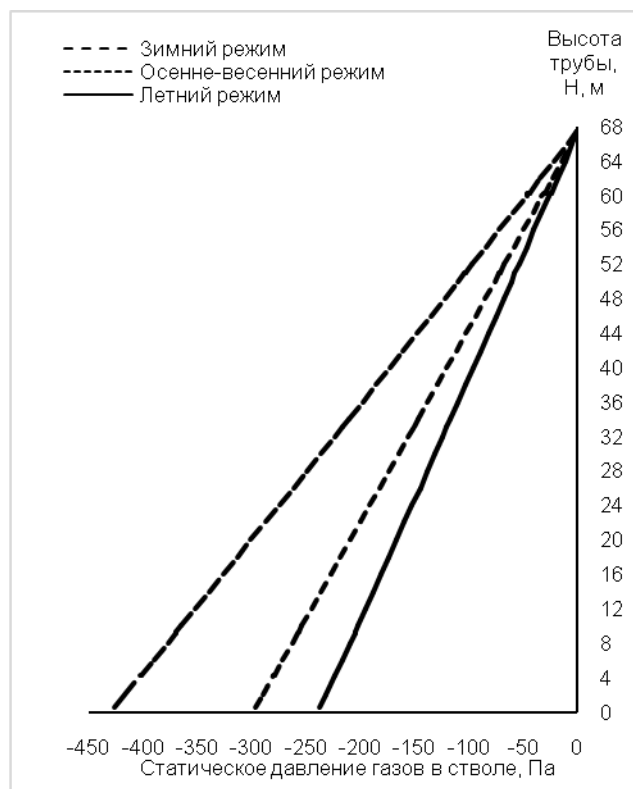


Рис. 7. Изменение статических давлений газов в стволе по высоте дымовой трубы в зависимости от режимов работы котлов

Все отопительные котельные и ТЭЦ в основном работают по температурному графику тепловой сети, и самые неблагоприятные условия для накопления влаги возникают в межсезонье, когда тепловые нагрузки на котлы минимальные (соответственно, минимальна и температура уходящих газов), а температура наружного воздуха уже достаточно низкая.

На рис. 8,б приведена графическая иллюстрация влажностного режима ограждения кирпичной трубы для пониженных нагрузок котлов в начале отопительного периода.

Расчеты показали, что при пониженной нагрузке котлов зона конденсации водяных паров располагается практически по всей толщине несущего ствола.

На основании полученных расчетов можно сделать вывод о том, что, поддерживая проектный режим работы котельных агрегатов, подключенных к дымовой трубе, ликвидировать процесс накопления влаги в толще существующих конструкций дымовых труб невозможно.

Как правило, проектный режим работы трубы при эксплуатации не соблюдается, поскольку производительность котельных агрегатов, подключенных к дымовой трубе, зависит от нагрузок потребителей и в большинстве случаев значительно изменяется во времени.

Снизить или ликвидировать конденсацию водяных паров внутри ограждений при эксплуатации дымовой трубы возможно только путем изменения ее конструкции.

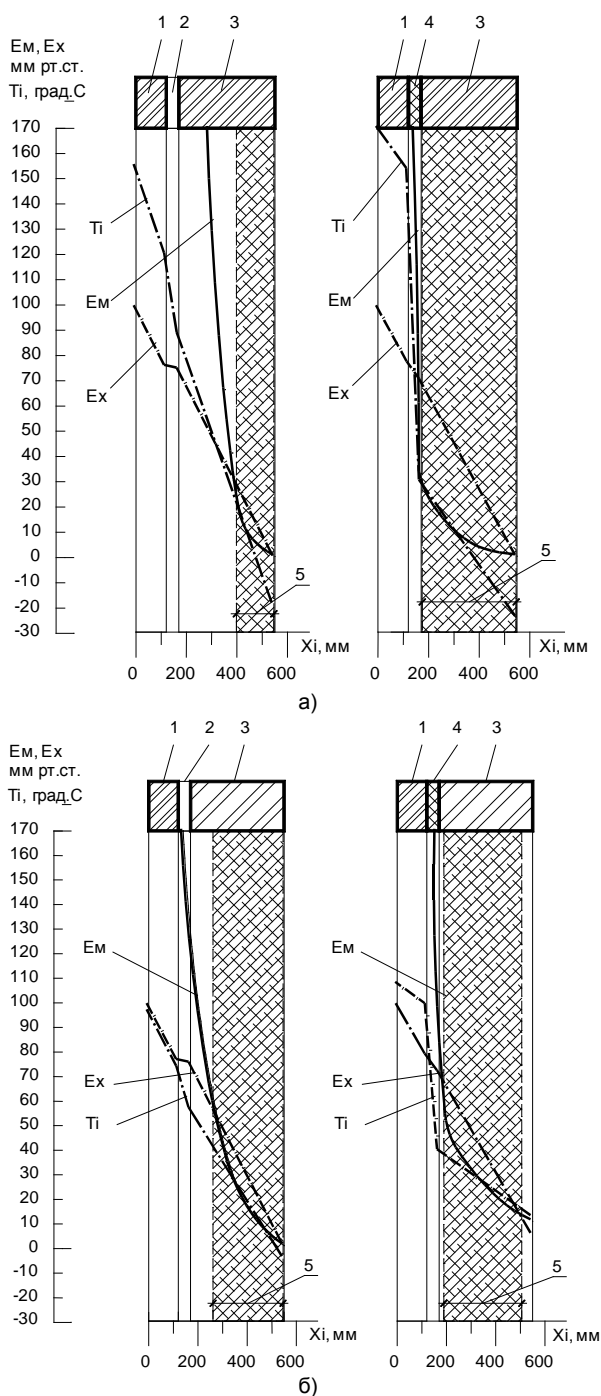


Рис. 8. Оценка влажностного режима существующих ограждений при установившемся тепловом состоянии дымовой трубы для зимнего (а) и осеннего (б) периода эксплуатации: слева – конструкция с воздушными неветилируемыми зазорами; справа – конструкция с тепловой изоляцией; 1 – футеровка; 2 – воздушный неветилируемый зазор; 3 – несущий ствол; 4 – теплоизоляция; 5 – зона возможной конденсации водяных паров;  $E_m$ ,  $E_x$  – максимальная и действительная упругость водяных паров соответственно, мм рт.ст.;  $T_i$  – температура в слое, °С

Для достижения этих целей необходимо распределить конструктивные слои ограждения с разными коэффициентами паропроницаемости и теплопроводности таким образом, чтобы зона возможной конденсации водяных паров при любых сочетаниях тепловых нагрузок котельных агрегатов и температуры наружного воздуха находилась за пределами ограждения.

Необходимым условием для предотвращения образования зоны возможной конденсации водяных паров внутри конструкций трубы является отсутствие пересечения линии максимальной их упругости с линией распределения действительной упругости.

На основании вышеуказанных условий для практического применения предлагаются два конструктивных технических решения изменения ограждающих конструкций эксплуатируемых кирпичных дымовых труб.

Первое из предлагаемых решений подразумевает устройство на внутренней поверхности трубы паронепроницаемого слоя или слоя с низким коэффициентом паропроницаемости за счет создания определенного «барьера» на пути движения водяных паров в ограждении от внутренних более нагретых слоев к наружным, имеющим более низкие температуры.

Вторым вариантом конструктивного решения может быть, например, конструкция, предусматривающая нанесение на наружную поверхность несущего ствола слоя тепловой изоляции керамического теплоизоляционного покрытия [14].

Результаты расчета влажностного режима для вышеназванных конструкций приведены на рис. 9, 10. Анализ графиков (рис. 9–10) показывает, что при всех возможных режимах эксплуатации подключенных к трубе котлов зона конденсации водяных паров внутри конструкций несущего ствола не образуется, так как линии максимальной и действительной их упругости не пересекаются.

## Заключение

Расчетный анализ режимов работы ограждающих конструкций существующих кирпичных дымовых труб показал, что основной причиной их разрушения является нарушение влажностного режима из-за несоответствия их конструкции реальным условиям эксплуатации котлов.

В целях повышения надежности работы существующих дымовых труб рекомендуется изменить конструкцию ограждений дымовой трубы таким образом, чтобы устранить накопление влаги внутри конструкций и избежать их разрушения при всех режимах эксплуатации котлов.

В реальных условиях эксплуатации наиболее приемлемым вариантом изменения ограждающей конструкции кирпичной дымовой трубы в целях предотвращения выпадения влаги внутри конструкций является нанесение на внутреннюю поверхность трубы паронепроницаемого слоя, например ремонтной смеси Мастер Эмако S488® толщиной 10–20 мм. Практика нанесения такого слоя на кирпичные дымовые трубы отопительных котельных ЖКХ подтвердила эффективность применения этого технического решения, в результате чего разрушения несущего ствола по истечении 10 лет эксплуатации не возникало.

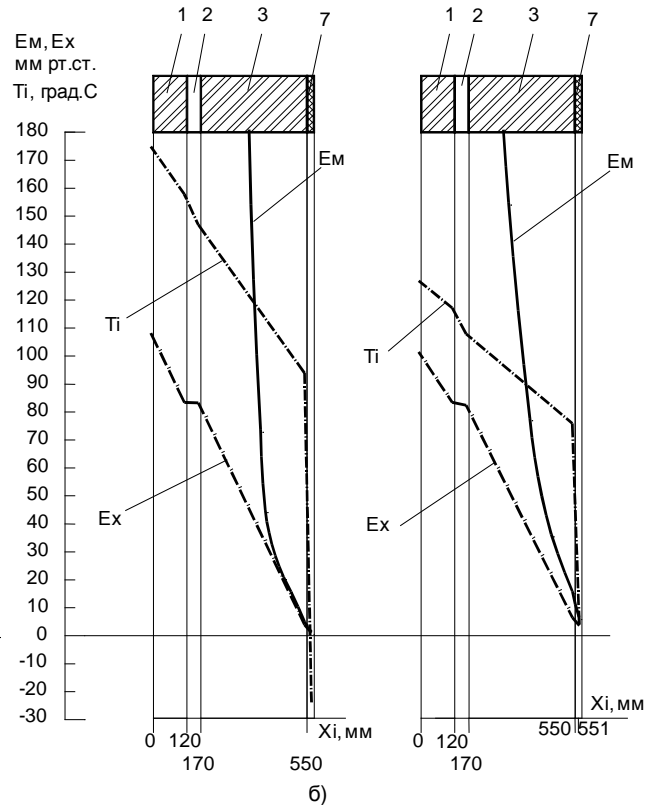
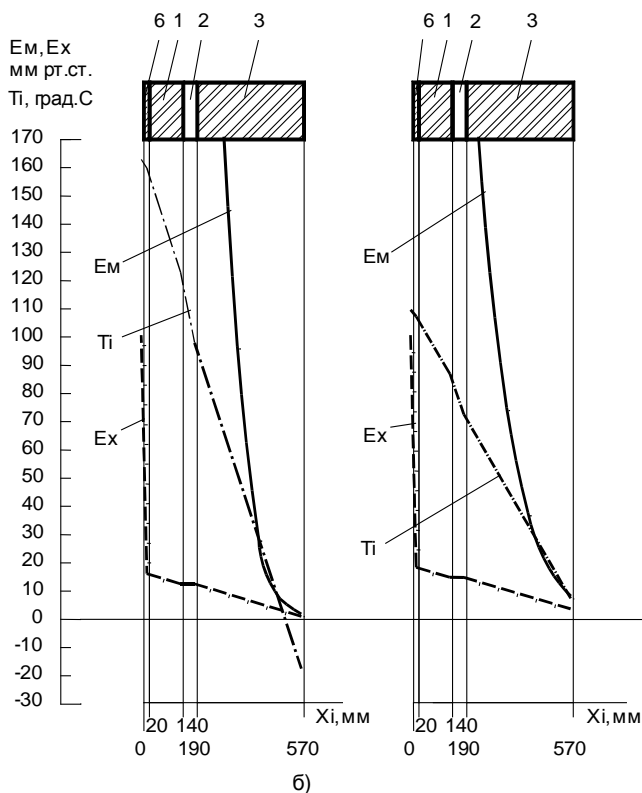
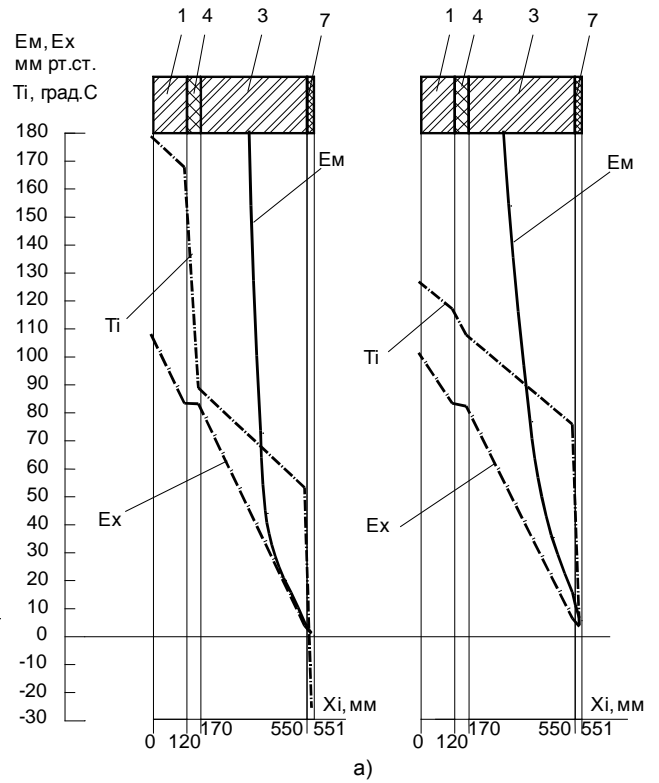
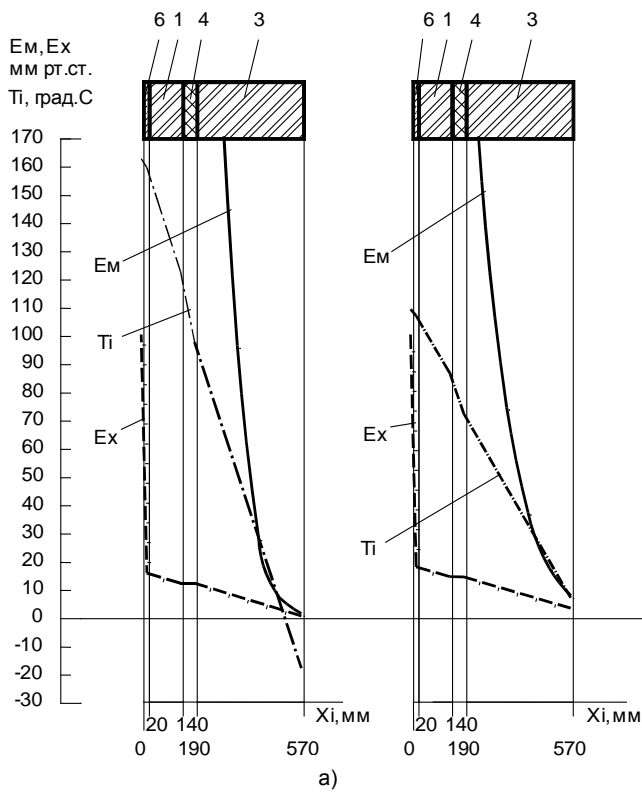


Рис. 9. Анализ тепловлажностного режима рекомендуемого конструктивного технического решения ограждения дымовой трубы с внутренним защитным паронепроницаемым слоем: а – конструкция с внутренней тепловой изоляцией между футеровкой и стволом; б – конструкция с воздушными неветилируемыми зазорами между футеровкой и стволом; 1 – футеровка; 2 – воздушный неветилируемый зазор; 3 – несущий ствол; 4 – теплоизоляция внутренняя (минераловатные плиты); 6 – торкрет из МАСТЕР ЭМАКО S488®; Em, Ex – максимальная и действительная упругость водяных паров соответственно, мм рт.ст.; Ti – температура в слое, °C; слева – зимний режим; справа – осенний режим

Рис. 10. Анализ тепловлажностного режима рекомендуемого конструктивного технического решения ограждения дымовой трубы с наружным слоем тепловой изоляции: а – конструкция с внутренней тепловой изоляцией между футеровкой и стволом; б – конструкция с воздушными неветилируемыми зазорами между футеровкой и стволом; 1 – футеровка; 2 – воздушный неветилируемый зазор; 3 – несущий ствол; 4 – теплоизоляция внутренняя (минераловатные плиты); 7 – теплоизоляция наружная; Em, Ex – максимальная и действительная упругость водяных паров соответственно, мм рт.ст.; Ti – температура в слое, °C; слева – зимний режим; справа – осенний режим



### Список литературы

1. **Стриха И.И.** Надежность работы дымовых труб // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 3.
2. **К вопросу** безопасности сборных железобетонных дымовых труб / А.В. Добедченков, А.А. Короткий, А.В. Панфилов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 5. – С. 71–75.
3. **Тамендаров Б.Э.** Опыт обследования и экспертизы промышленных дымовых труб с внутренними газоотводящими стволами // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 10. – С. 98–100.
4. **Принципиальные** подходы к оценке промышленной безопасности дымовых труб / И.А. Буланов, Р.Ю. Якубовский, И.А. Олипер и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 10. – С. 100–103.
5. **Яблонько Е.В.** Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб // Молодой ученый. – 2011. – № 9. – С. 65–68.
6. **Фадеева Г.Д., Гарькин И.Н., Забилов А.И.** Экспертиза промышленной безопасности промышленных дымовых металлических труб // Молодой ученый. – 2014. – № 12. – С. 117–119.
7. **Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н.** Обследование дымовых промышленных труб // Молодой ученый. – 2014. – № 1. – С. 94–95.
8. **Реконструкция** газоотводящего тракта Ивановской ТЭЦ-1 в условиях работы ПГУ / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, С.Д. Горшенин, И.В. Оверченко // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 14–18.
9. **Вдовченко В.С.** Энергетическое топливо СССР (Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут, и горючий природный газ). Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. **Ильинский В.М.** Строительная теплофизика. (Ограждающие конструкции и микроклимат зданий). – М.: Высш. шк., 1974. – 320 с.
11. **Разработка** программных средств анализа и контроля работы дымовых труб с вентилируемым каналом / Ю.В. Салов, В.А. Семашко и др. // Вестник ИГЭУ. – 2002. – Вып. 1. – С. 60–64.
12. **Салов Ю.В., Семашко В.А., Варнашов В.В.** Программа для ЭВМ «Теплоаэродинамический расчет дымовых труб с прижимной футеровкой» / Свидетельство об официальной регистрации № 2004611807. – М.: Роспатент, 2004.
13. **Шишков И.А., Лебедев В.Г., Беляев Д.С.** Дымовые трубы энергетических установок. – М.: Энергия, 1976. – 176 с.
14. **Бухмиров В.В., Гаськов А.К.** Применение тонкопленочных покрытий для целей энергосбережения // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 5. – С. 26–31.

### References

1. Strikha, I.I. Nadezhnost' raboty dymovykh trub [Operation reliability of chimney stacks]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2009, no. 3.
2. Dobedchenkov, A.V., Korotkiy, A.A., Panfilov, A.V., Rak, V.I., Yakimenko, I.V. K voprosu bezopasnosti sbornykh zhe-

lezobetonnykh dymovykh trub [On safety of precast reinforced-concrete chimneys]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2015, no. 5, pp. 71–75.

3. Tamendarov, B.E. Opyt obsledovaniya i ekspertizy promyshlennykh dymovykh trub s vnutrennimi gazootvodyashchimi stvolami [Experience in examination of industrial chimneys with internal gas exhaust ducts]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2015, no. 10, pp. 98–100.

4. Bulanov, I.A., Yakubovskiy, R.Yu., Oliper, I.A., Piluy, Yu.V., Afrimovich, G.G. Printsipial'nye podkhody k otsenke promyshlennoy bezopasnosti dymovykh trub [Fundamental approaches to assessment of industrial safety of chimneys]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2015, no. 10, pp. 100–103.

5. Yablon'ko, E.V. Osnovnye problemy v ekspluatatsii dymovykh trub [Main problems of chimney operation]. *Molodoy uchenyy*, 2011, no. 9, pp. 65–68.

6. Fadeeva, G.D., Gar'kin, I.N., Zabiroy, A.I. Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti promyshlennykh dymovykh metallicheskikh trub [Examination of industrial safety of industrial metal chimneys]. *Molodoy uchenyy*, 2014, no. 12, pp. 117–119.

7. Kuz'mishkin, A.A., Gar'kin, I.N. Obsledovanie dymovykh promyshlennykh trub [Examination of industrial chimneys]. *Molodoy uchenyy*, 2014, no. 1, pp. 94–95.

8. Salov, Yu.V., Varnashov, V.V., Gorshenin, S.D., Overchenko, I.V. Rekonstruktsiya gazootvodyashchego trakta Ivanovskoy TETs-1 v usloviyakh raboty PGU [Reconstruction of gas-exhaust duct of Ivanovo Heat-Power Plant No. 1 with combined-cycle gas turbines]. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 2, pp. 14–18.

9. Vdovchenko, V.S. *Energeticheskoe toplivo SSSR (Iskopaemye ugli, goryuchie slantsy, torf, mazut, i goryuchiy prirodnyy gaz)* [USSR power-plant fuels (Fossil coal, pyroschists, peat, fuel oil and flammable natural gas). A guidebook]. Moscow, Energoatomizdat, 1990.

10. Il'inskiy, V.M. *Stroitel'naya teplofizika. (Ograzhdayushchie konstruksii i mikroklimat zdaniy)* [Building thermal physics (Walling structures and building environment)]. Moscow, Vysshaya shkola, 1974. 320 p.

11. Salov, Yu.V., Semashko, V.A. Razrabotka programnykh sredstv analiza i kontrolya raboty dymovykh trub s ventiliruемым каналом [Development of software tools for operation analysis and control of chimneys with a ventilated duct]. *Vestnik IGEU*, 2002, issue 1, pp. 60–64.

12. Salov, Yu.V., Semashko, V.A., Varnashov, V.V. *Programma dlya EVM «Teploaerodinamicheskii raschet dymovykh trub s prizhimnoy futerovkoy»*. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii № 2004611807* [Computer program «Thermoaerodynamic calculation of chimneys with pressure lining» / Official registration certificate No. 2004611807]. Moscow, Rospatent, 2004.

13. Shishkov, I.A., Lebedev, V.G., Belyaev, D.S. *Dymovye trubyy energeticheskikh ustanovok* [Chimney stacks of power plants]. Moscow, Energiya, 1976. 176 p.

14. Bukhmirov, V.V., Gas'kov, A.K. Primenenie tonkoplenochnykh pokrytiy dlya tseley energosberezheniya [Application of thin film coatings for power saving]. *Vestnik IGEU*, 2015, no. 5, pp. 26–31.

**Варнашов Виктор Васильевич**,  
ООО «Научно-производственная коммерческая фирма «ЭЛВЕСТ»»,  
кандидат технических наук, главный технолог,  
e-mail: viktor.varnashov@yandex.ru

**Киселев Александр Анатольевич**,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения,  
e-mail: kaa\_alp@mail.ru

**Гребнов Вячеслав Сергеевич**,  
ООО «Научно-технический центр «Система»»,  
заместитель директора,  
e-mail: system37@mail.ru