



## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДИК ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ

К.М. Мирсалихов, А.М. Грибков, Н.Д. Чичирова

Казанский государственный энергетический университет»,  
г. Казань, Россия

*mirsalikhovkm@gmail.com, gribkovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru*

**Резюме:** наиболее значимые технические решения должны оптимизироваться с помощью технико-экономического анализа, что позволяет уменьшить затраты на их реализацию. В связи с тем, что от скорости газов в стволе дымовой трубы зависит ее диаметр и высота, этот параметр является определяющим при проведении технико-экономического анализа. Однако существующие в Российской Федерации методики и нормативные документы, касающиеся строительства и проектирования дымовых труб учитывают не все необходимые характеристики и параметры, например, экономическую составляющую определения оптимальной скорости газов. **ЦЕЛЬ.** Обзор зарубежных источников, в которых рассматриваются указанные вопросы и проблемы. **МЕТОДИКА.** Для обзора были выбраны нормативные документы и научные работы, опубликованные в технически наиболее развитых странах. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе анализа методологии моделирования рассеивания примесей и расчета высоты дымовой трубы были сделаны выводы о том, что, несмотря на большое количество расчетных моделей, наиболее точными являются модели рассеивания вредных примесей в воздухе, основанные на метеорологических данных, характерных для конкретного региона. Однако ни одна из рассмотренных методик выбора основных размеров дымовой трубы не основана на определении оптимальной скорости выхода газов, исходя из технико-экономического анализа. Выбор скорости газов носит рекомендательный характер и в основном связан с условиями формирования начального участка дымового факела и не зависит от стоимости трубы. Разрабатываемая в России методика позволяет учесть более широкий спектр условий работы дымовой трубы, в т.ч. и для переходного этапа к «Зеленой энергетике», когда состав продуктов сгорания будет меняться в зависимости от доли водорода в котельном топливе.

**Ключевые слова:** дымовые трубы; тепловые электрические станции; рассеивание вредных выбросов, оптимальная скорость газов; высота дымовой трубы; нормативные методики; экология и энергетика; промышленные объекты.

**Для цитирования:** Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 131-145. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.

## ANALYSIS OF METHODS FOR SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF STACK

K.M. Mirsalikhov, A.M. Gribkov, N.D. Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*mirsalikhovkm@gmail.com, gribkovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru*

**Abstract:** the most significant technical solutions should be optimized using a technical and economic analysis, which reduces the cost of their implementation. Due to the fact that the diameter and height of the chimney depends on the gas velocity in the chimney, this parameter is decisive when carrying out a feasibility study. However, the existing methods and regulations in the Russian Federation concerning the construction and design of chimneys do not take into account all the necessary characteristics and parameters, for example, the economic component of determining the optimal gas velocity. **PURPOSE** of this article is to review foreign sources, in which consider similar issues and problems to take into account foreign experience in the development of a new methodology. **METHODOLOGY.** For the review, regulatory documents and

*scientific papers published in the most technically advanced countries were selected. RESULTS. In the course of analyzing the methodology for modeling the dispersion of impurities and calculating the height of the stack, it was concluded that, despite the large number of calculation models, the most accurate models are dispersion in air, based on meteorological data specific to a particular region. However, none of the considered methods for choosing the main dimensions of the stack is based on determining the optimal gas outlet rate based on the technical and economic analysis. The choice of the gas outlet rate is of a recommendatory nature and is mainly associated with the conditions for the formation of the initial section of the smoke plume and is not associated with the cost of the stack. The technique being developed in Russia makes it possible to take into account a wider range of chimney operating conditions, incl. and for the transitional phase to Green Energy, when the composition of combustion products will change depending on the proportion of hydrogen in the boiler fuel.*

**Keywords:** *stack; thermal power plants; dispersion of harmful emissions; optimal gas velocity; stack height; regulatory procedures; ecology and energy; industrial facilities.*

**For citation:** Mirsalikhov KM, Gribkov AM, Chichirova ND. Analysis of methods for selection of optimal parameters of stack. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):131-145. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.

### **Введение**

Дымовые трубы - самые дорогостоящие элементы вспомогательного оборудования тепловых электрических станций, стоимость которых может превышать 500 млн. руб. К проектированию и строительству подобных сооружений должны предъявляться повышенные требования, так как ошибки и неточности могут привести к серьезному финансовому и экологическому ущербу. Очевидно, что одним из таких требований должна стать единая, утвержденная законодательством, методика определения оптимальных параметров дымовых труб. Попыткой сделать нечто подобное стал утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 14 декабря 2017 г. № 1667/пр [1] и введенный в действие с 15 июня 2018 г. свод правил «Трубы дымовые промышленные. Правила проектирования» [2]. Но в данном своде отсутствует методика расчета оптимальных значений скорости выхода газов и высоты дымовой трубы, а даны лишь общие рекомендации по их выбору, которые не гарантируют от существенных ошибок при проектировании дымовых труб. Кроме того, в данном своде нет рекомендаций для многоствольных дымовых труб. Таким образом в утвержденном своде для проектирования дымовых труб отсутствуют методики определения ряда параметров, а выбор диаметра устья и высоты дымовой трубы проектные организации проводят на основании методик технико-экономических расчетов, не утвержденных в качестве обязательных стандартов. К тому же эти методики иногда опираются на планово-распределительную модель экономического развития страны. В связи с этим представляет интерес как такие вопросы решаются за рубежом.

### **Материалы и методы**

Рассмотренные материалы обработаны методами научного исследования, такими как анализ (исследование отдельных вариантов), сравнения (нахождение общих и различных моментов в вариантах), синтеза (выработка новой концепции). Для анализа целесообразно обратиться к странам лидерам в энергетическом машиностроении, в выработке электроэнергии и с развитым экологическим и энергетическим законодательством.

Все западные страны проектируют дымовые трубы согласно разработанных международным комитетом промышленных сооружений (*International Committee on Industrial Construction (CICIND)*) кодам, то есть методики расчета параметров труб остаются различными в каждой стране, но конструкция труб приводится в соответствии с кодами *CICIND* [3].

В Великобритании после выхода из Евросоюза касательно дымовых труб на данный момент действует несколько нормативных документов:

1. Акт об окружающей среде, 1995 г. (*Environment Act, 1995*). [4]
2. Акт о защите окружающей среды 1990 г. (*Environmental Protection Act, 1990*) [5]
3. Третье издание акта чистого воздуха 1956 года меморандум по высотам дымовых труб (*The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights (Department of the Environment, 1981)* [6]
4. Акт чистого воздуха 1993 (*The Clean Air Act 1993*) [7]

Все эти нормативные документы связаны между собой, но особое внимание необходимо уделить Environmental Protection Act 1990, так как в нем в главе «Руководство по высоте рассеивающей трубы для загрязняющих выбросов» (Guidelines on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions) достаточно подробно изложена методика определения оптимальных параметров дымовых труб.

По этой методике высота дымовой трубы рассчитывается с использованием индекса загрязнения (*Pollution Index*),  $P_i$ , и информации о выбросах в данном районе и ближайших источниках выбросов. Расчет состоит из трех этапов. Рассчитываются две высоты дымовой трубы в первом приближении,  $U_b$  и  $U_m$ , с учетом тепловой и динамической составляющей подъема дымового факела, соответственно. Затем рассчитывается окончательная высота трубы с поправкой на выброс из близлежащих источников.

Нескорректированная высота дымовой трубы  $U_b$ , м, рассчитывается с использованием индекса загрязнения  $P_i$  и плавучести выбросов. В подавляющем большинстве случаев, когда выбрасываемые газы являются продуктами сгорания или, в основном, представляют собой воздух, содержащий небольшую долю загрязняющих веществ, плавучесть обеспечивается непосредственно за счет тепла, содержащегося в выбрасываемых дымовых газах  $Q$  (МВт) на выходе из трубы.

Нескорректированная высота дымовой трубы  $U_m$  рассчитывается с использованием индекса загрязнения  $P_i$  и динамической составляющей выбрасываемых газов  $M$ . Подробно методика изложена в таблице 1.

По поводу выбора скорости выхода дымовых газов говорится только, что для предотвращения аэродинамического смыва вниз выбрасываемого шлейфа и его стекания за пределы устья вниз вдоль трубы рекомендуются их следующие минимальные значения:

- при тепловой мощности выброса  $Q$ :
  - менее 0,1 МВт - 10 м/с.
  - более 1 МВт - 15 м/с.
  - от 0,1 МВт до 1 МВт, пропорционально.
- При динамической составляющей  $M$ :
  - менее  $10 \text{ м}^4/\text{с}^2$  - 10 м/с.;
  - более  $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$  - 15 м/с.;
  - от 10 до  $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$  – пропорционально.

Приведенный пример рекомендаций по поводу выбора скорости выхода является одним из самых подробных в рассмотренных источниках, но и в нем нет технико-экономических обоснований выбора скорости выхода газов.

В США в настоящее время действует разработанное в 1985 Агентством по защите окружающей среды (*Environment Protection Agency*) «Руководство по определению высоты дымовой трубы согласно надлежащей инженерной практике» (*Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document For the Stack Height Regulations)*) [8] как документ технической поддержки для руководства по определению высоты дымовой трубы. Высота дымовой трубы по [8] больше или равна высоте, на которой выброс струи из дымовой трубы не зависит от нисходящих потоков. Срыв потока вниз, в свою очередь, относится к застоному циркулирующему вихрю воздуха, который образуется с подветренной стороны источника выброса.

Высота дымовой трубы по [8] зависит от многих переменных:

- форма и размер соседних зданий;
- окружающая местность;
- ближайшие здания и сооружения;
- характеристики местного климата.

Согласно правилам Агентства по защите окружающей среды (EPA), высота дымовой трубы по [8] определяется как самая высокая из следующих:

– Не менее 65 метров при измерении от отметки уровня земли у основания дымовой трубы.

–  $2,5H$  (для труб, построенных до 12 января 1979 г.), или  $H + 1,5 L$  (для всех других дымовых труб), где  $H$  - высота самого здания или любой значимой соседней конструкции или сооружений, а  $L$  - меньшее из проектируемых высоты или ширины рассматриваемого здания.

– Высота, определенная с учетом атмосферной турбулентности в пределах пограничного слоя и вихревых эффектов, создаваемых застройкой. Расчет подробно изложен в [9].

Первый критерий просто устанавливает минимальную высоту дымовой трубы, в то время как второй является очень общим методом, который, однако, не может охватить все ситуации. Индивидуальный подход в этом случае может дать более точные результаты.

Исследование атмосферного пограничного слоя в аэродинамической трубе предлагаемого или существующего здания является общепринятым методом, который можно использовать для обоснования оптимальной высоты трубы, которая может сильно отличаться от часто цитируемого значения высоты здания, увеличенной в 2,5 раза. Это подтверждается в статье [10] где в ходе воздушного мониторинга было обнаружено что в городе Ринландер (США), имело место превышение часового стандарта концентрации оксидов серы  $SO_2$ . Анализ источников выбросов и моделирование качества воздуха показало, что дымовая труба котельной *Expera Rhineland Mill* высотой 63 м, вносит основной вклад в воздействие на окружающий воздух. Для устранения превышения допустимых значений одним из решений являлось увеличить высоту дымовой трубы до высоты по [8]. Исходя из габаритов здания котла, высота дымовой трубы по [8] составила 75 м. После исследования геометрии здания *Expera Rhineland Mill* было замечено, что угол здания котельного агрегата №7 находится прямо с наветренной стороны от дымовой трубы. Когда ветер дует вдоль угла здания, образуются вихри в углах здания, которые усиливают снос дымового факела вниз в два раза по сравнению с тем, что наблюдается для направлений ветра, нормальных к фасаду здания. Эксперименты, проведенные в аэродинамической трубе, показали, что необходимая высота трубы по [8] может достигать 95 м для ситуации углового вихря. Таким образом фактическая высота дымовой трубы по [8], полученная с использованием моделирования в аэродинамической трубе, была принята 90 м, что значительно превышает высоту 75 м по формуле [8]. Наиболее подробно исследования по определению высоты GEP представлены в [11-21].

То есть методика [8] в самом простом случае рекомендует высоту не ниже 65 метров или  $H + 1,5 L$ , во всех других случаях необходимы исследования в аэродинамической трубе. Касательно скорости выхода газов указано лишь, что она должна быть такой, чтобы не допустить срывания дымового факела вниз.

Несмотря на то, что в финальной версии методики [8] отсутствует связь между высотой дымовой трубы и скоростью выхода газов из устья, в США, в проведенном ранее исследовании [22], отмечалось что при проектировании крупных котельных установок очевидна тенденция к использованию большей скорости на выходе из устья трубы. В некоторых случаях, таких как законодательное ограничение высоты дымовой трубы для контроля защиты дыхательных органов людей, может не быть альтернативы использованию более высоких скоростей на выходе для получения необходимого рассеивания дымового шлейфа. В других случаях существующие конструкции могут быть неспособны выдерживать ветровую нагрузку, создаваемую на более высокие трубы. Для больших электростанций, где для рассеивания шлейфа предусмотрены дымовые трубы, превышающие высоту здания электростанции более чем в 2,5 раза, преимущество и эффективность относительно высоких скоростей истечения считаются сомнительными. В качестве проверки более высоких выходных скоростей для увеличения эффективной высоты дымовой трубы в устье дымовой трубы от котла блока мощностью 150 МВт было установлено сопло, увеличивающее скорость с 13,7 до 27,4 м/с. Наблюдения и сравнение с соседними агрегатами без сопел не выявили заметного увеличения подъема шлейфа во время инверсии или в условиях высокой скорости ветра. Хотя некоторая выгода была обнаружена при ветрах средней скорости, 2,2 – 3,6 м/с. Точность расчета по этой метеорологической модели, как правило, выше, чем по другим.

На начальном участке траектории преобладающее значение имеет динамическая составляющая подъема дымового факела, с удалением от трубы начинает преобладать тепловая составляющая. Скорость от 15 до 18 м/с была традиционно принята как достаточная для предотвращения значительного срыва вниз с подветренной стороны дымовой трубы. Более высокие скорости от 27-37 м/с, увеличивают размер и стоимость тягодутьевой машины, двигателя и затраты на обслуживание дымовой трубы, а также могут препятствовать поднятию дымового шлейфа из-за плавучести.

Как следует из Статьи 5 Директивы ЕС по сжиганию топлива [23] цитируется: «Установки для сжигания топлива или совместного сжигания различных видов топлива должны быть спроектированы, оборудованы, построены и эксплуатироваться таким образом, чтобы предотвращать выбросы, вызывающие значительное загрязнение воздуха на уровне земли, в частности, дымовые газы сбрасываются контролируемым образом и в соответствии с соответствующими стандартами качества воздуха». Однако не существует общеевропейской методологии моделирования качества воздуха и расчета высоты дымовой

трубы. Для этой цели используются национальные стандарты и рекомендации. В настоящее время существует большое количество расчетных моделей, которые различаются в каждой стране ЕС. Наиболее точными являются модели рассеяния в воздухе, основанные на краткосрочных метеорологических данных, всегда представляемых в виде компьютерных программ. Эти модели обычно закупаются крупными компаниями или используются консалтинговыми компаниями для работы на конкретных заводах и ТЭС, и, как правило, они используются для больших котельных агрегатов или иных установок со значительными выбросами в атмосферу.

Методика определения высоты дымовых труб, используемая в Испании изложена в постановлении Министерства окружающей среды от 18 октября 1976 г. «О предотвращении и устранении промышленного загрязнения атмосферы» [24]. Как указано в этом документе: «настоящее распоряжение устанавливает инструкции по расчету высоты дымовой трубы для достижения наиболее адекватного рассеивания загрязняющих веществ с целью обеспечения требуемого качества воздуха. Методика включена в Приложение II к настоящему Приказу и применима в целом для установок с общей выходной мощностью менее 100 МВт (тепловых), а также для дымовых труб, выбрасывающих максимум 720 кг/ч любого газа или 100 кг/ч твердых частиц. В дополнение к этому, формулы применимы, если дым имеет минимальный импульс за счет разницы температур дымовых газов в трубе и окружающей среды, то есть соответствует уравнению представленному в таблице 1.

В Швеции требования для расчета высоты дымовой трубы в качестве руководящих принципов установлены Шведским агентством по охране окружающей среды (*SEPA*), особенно для тепловых установок небольшого размера и мощности. Эти рекомендации были созданы в 1970 году и сначала включали только выбросы диоксида серы от сжигания нефти. Спустя годы это руководство было обновлено на основе отчетов, которые Шведский метеорологический и гидрологический институт (*SHMI*) разработал для *SEPA* [25]. Эти новые правила включали расчет высоты дымовой трубы с учетом также выбросов оксидов азота. Эта методика не применима для использования в сложных ситуациях, где рекомендуется дальнейшее конкретное исследование, например:

- ТЭС, расположенные на особо пересеченной местности;
- ТЭС со значительными выбросами из нескольких труб;
- для труб высотой более 60 м;
- ТЭС, расположенные в городских районах, где концентрация  $\text{NO}_2$  у земли близка к превышению.

В Германии действуют правила контроля загрязнения воздуха «Технические инструкции по контролю качества воздуха» и обычно называемые *TA LUFT* [26]. Они содержат требования к крупномасштабным установкам и включают график для оценки высоты дымовых труб. В этом документе указывается, что: «Отработанные газы должны сбрасываться таким образом, чтобы было возможно их беспрепятственное рассеивание свободным потоком воздуха. Как правило, требуется выброс через дымовые трубы, высота которых должна определяться в соответствии с пунктами 5.5.2–5.5.4. В этих разделах документа указано, что «дымовые трубы должны иметь высоту не менее 10 м над уровнем земли». На сегодняшний день для расчета используют компьютерную программу *BESMIN* разработанную согласно правилам и на основе номограммы *TA LUFT*.

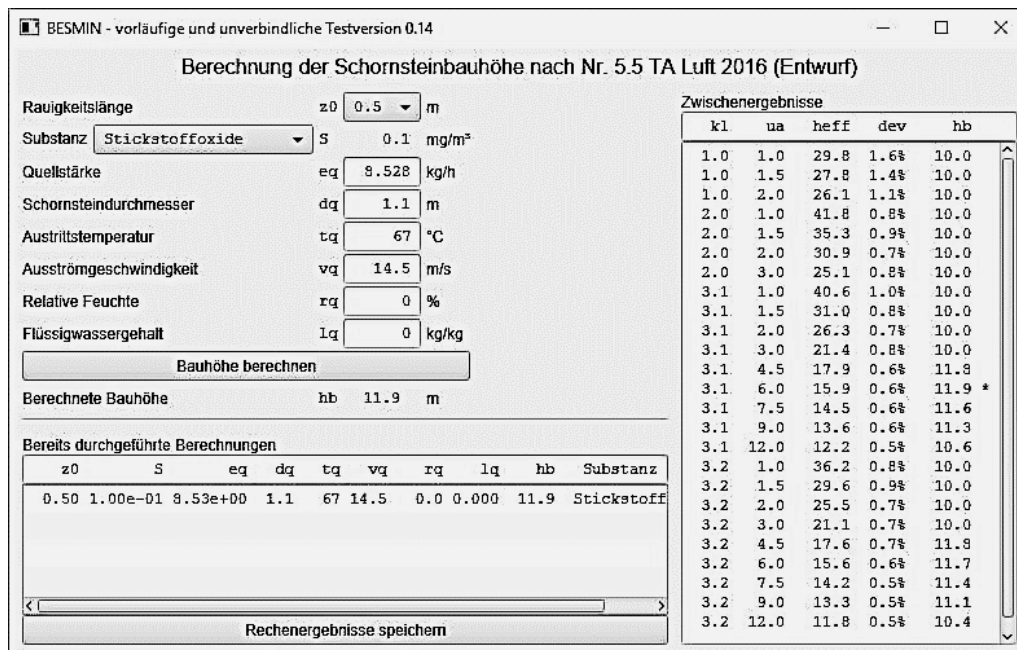


Рис. 1. Компьютерная программа BESMIN

Fig. 1. BESMIN computer program

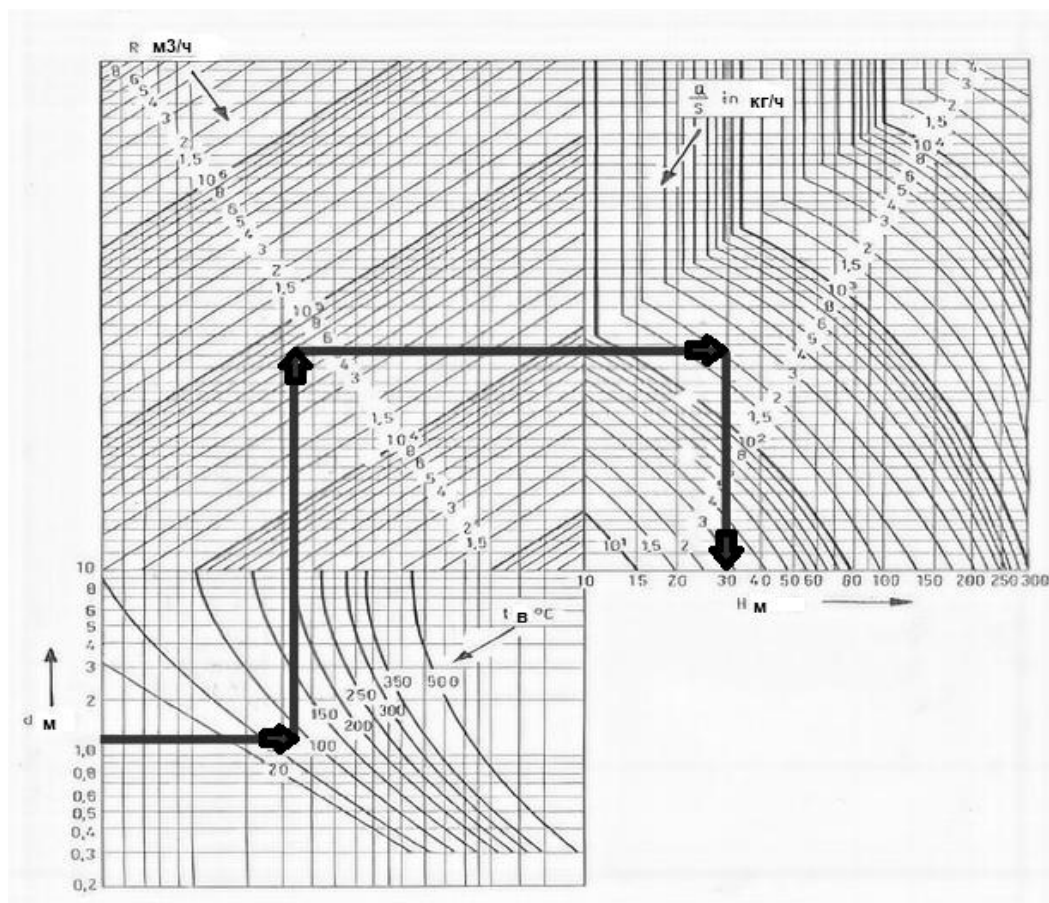


Рис. 2. Номограмма TA LUFT для определения высоты дымовой трубы

Fig. 2. TA LUFT nomogram for determining the height of the chimney

- $R$  - сухой объемный расход уходящих газов, м<sup>3</sup>/ч;
- $H$  - высота дымовой трубы по номограмме, м;
- $d$  - внутренний диаметр дымовой трубы, м;
- $T$  - температура отходящего газа на выходе из дымовой трубы, °C;
- $Q$  - массовый расход выбрасываемого загрязнителя в атмосферу, кг/ч;
- $S$  - коэффициент определения высоты трубы.

Вместо номограммы можно использовать компьютерную программу BESMIN.

Центральный совет по контролю за загрязнением (CPCB), национальное агентство правительства Индии, реализующее закон об окружающей среде, предложило «формулу минимальной высоты дымовой трубы», основанную на уравнении Гаусса, в качестве ориентира для оценки высоты дымовой трубы (CPCB) [27], далее были уточнения в [28] и [29]. Формула, разработанная CPCB в 1984 году, считалась применимой для всего Индийского полуострова. Считалось, что метеорологические данные двух городов Мумбаи и Калькутта представляют прибрежную метеорологию, а метеорологические данные Дели использовались для представления внутренней метеорологии. Высота смешения была определена на основе данных радиозонда, собранных Метеорологическим департаментом Индии (IMD). Температура дымовых газов принималась такой же, как и температура окружающего воздуха. Предложенная формула считалась действительной для всех мощностей ТЭС, т.е. влияние скорости на выходе и подъема факела не учитывалось. Было получено уравнение с учетом метеорологии трех городов:

$$H = a \cdot Q \cdot b.$$

Чтобы получить общую формулу для всей страны, коэффициент  $a$  и показатель степени  $b$ , полученные для всех трех городов, были арифметически усреднены. Окончательная полученная формула представлена в Таблице 1

Поскольку в дополнение к подробным метеорологическим данным с меньшими предположениями в настоящее время доступны более сложные и лучшие модели качества воздуха, которые облегчают более строгий учет условий рассеивания, в статье [30] была предпринята попытка разработки новой формулы для оценки минимальной высоты дымовой трубы. На рисунке 5 показано изменение требуемой высоты дымовой трубы в зависимости от интенсивности выбросов  $\text{SO}_2$  для разных мест для двух случаев ТЭС мощностью 110 МВт и 500 МВт. Точки на кривой — это высота дымовой трубы, полученная в результате моделирования. Сплошной линией представлена кривая, полученная с помощью регрессионного анализа. Регрессионный анализ проводится для определения уравнения, которое лучше всего соответствует точкам данных. Кривая, которая дает коэффициент регрессии  $R^2$  более 0,9, принимается. В таблице 1 представлено уравнение для высоты дымовой трубы, коэффициента регрессии и диапазона интенсивности выбросов  $\text{SO}_2$ , в пределах которого уравнение действительно для ТЭС 110 МВт и 500 МВт соответственно.

Графики получены при различных метеорологических условиях. Характер кривой высоты дымовой трубы показывает изменение разбавляющего потенциала атмосферы с высотой, усредненной за 24-часовой период. Сравнивая кривые для 110 МВт и 500 МВт для каждого из выбранных городов, делаются два наблюдения. Кривые 110 МВт и 500 МВт показывают аналогичную тенденцию.

Это указывает на то, что изменение скорости газа на выходе, диаметра верхней части трубы, температуры газа на выходе не вызывает каких-либо изменений в тенденции кривой, вместо этого именно метеорология определяет тенденцию кривой высоты трубы и, следовательно, потенциал вертикального разбавления в атмосфере. Во-вторых, при той же интенсивности выбросов высота дымовой трубы, необходимая для 110 МВт, больше, чем для 500 МВт. Это объясняется более высоким подъемом дымового газа, выбрасываемого из дымовой трубы мощностью 500 МВт из-за более высокой скорости на выходе, диаметра верхней части дымовой трубы и температуры дымового газа по сравнению с 110 МВт. Сравнивая уравнение для двух сезонов, лета и зимы, было обнаружено, что дополнительная высота дымовой трубы для увеличения нагрузки выбросов  $\text{SO}_2$  остается постоянной (прямолинейная зависимость) для летнего сезона, в то время как она уменьшается для зимнего сезона. Чтобы получить допустимую приземную концентрацию  $80 \text{ мкг/м}^3 \text{ SO}_2$  (в России  $500 \text{ мкг/м}^3$ ) высота дымовой трубы, определяемая по зимним условиям, оказывается меньше, чем в летний период.

В Китае действует нормативный документ, разработанный министерством экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики (*Ministry of ecology and environment the people's Republic of China*) (MEE) GB 13223-2011 «Стандарт по загрязняющим выбросам ТЭС» (*Emission standard of air pollutants for thermal power plants*) [31]. В предыдущих версиях этого документа [32] был приведен расчет по определению высоты дымовой трубы, в новой же версии этот расчет отсутствует и теперь вопросом определения высоты дымовой трубы должны заниматься специализированные организации, а их расчет подтверждать MEE.

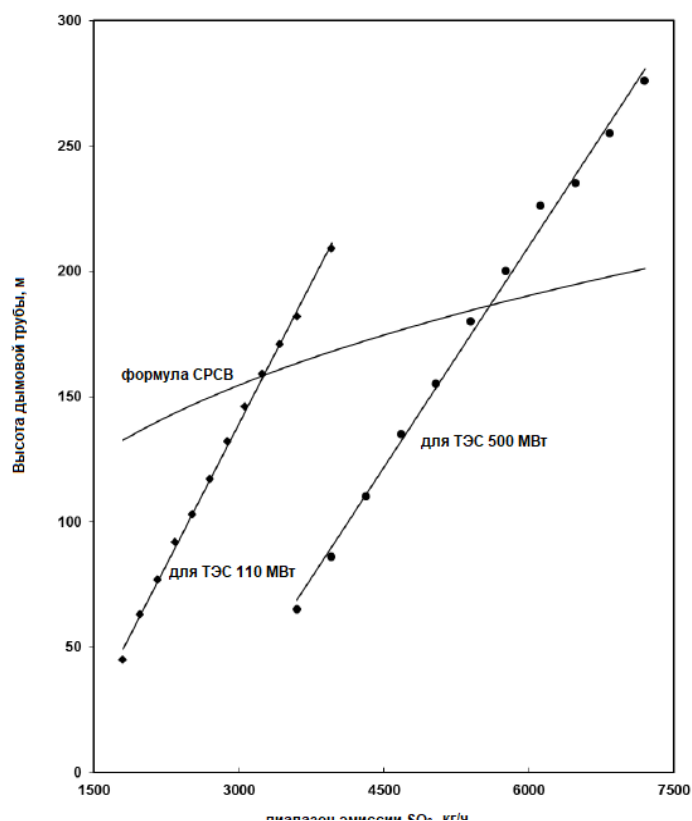


Рис. 3. Варианты определения высот дымовых труб ТЭС для г. Матхура (летний сезон)

Fig. 3. Options for determining the height of TPP chimneys for Mathura (summer season)

О скорости выхода дымовых газов, также говорится в документе «Контроль загрязнения воздуха. Инженерные технические принципы» НД2000-2010 [33] из 5.3 5.3.5 где скорости газов на выходе из трубы следует принимать 15 м/с. Если дымовая труба высокая или объемный расход газов велик то, может быть целесообразным увеличить скорость потока на выходе до 20 м/с ~ 25 м/с.

О скорости дымовых газов говорится в статье [34]. Отмечается, что, поскольку полное преимущество скорости на выходе может быть получено только при работе котельного агрегата с полной нагрузкой, тогда как дополнительная высота трубы будет полезна при любой нагрузке, делается вывод, что более экономично вложиться в дополнительную высоту трубы, чем тратить средства на дополнительную скорость на выходе. Кроме того, отмечается более высокий экологический эффект при равных затратах, а также то, что при увеличенных скоростях дымовых газов возможны нарушения в работе электрофильтров.

В [35] говорится о том, что модели рассеивания показали, что высота дымовой трубы гораздо более важна для рассеивания дымовых газов, чем плавучесть выпускаемого газа. Плавучесть выпускаемого газа (и, следовательно, дисперсия) может быть увеличена при необходимости путем повторного нагрева дымового газа, но дисперсия также может быть улучшена за счет более высокой скорости на выходе из трубы.

### Результаты

Были проанализированы материалы, опубликованные ведущими учеными и специализированными фирмами. Ни одна из методик выбора основных размеров дымовой трубы, рассмотренных в приведенном списке литературы, не основана на определении оптимальной скорости выхода газов исходя из технико-экономического анализа. Выбор скорости выхода газов носит рекомендательный характер и в основном связан с условиями формирования начального участка дымового факела и не связывается со стоимостью трубы. В то же время многие исследователи в своих статьях и комментариях к нормативным документам сходятся во мнении что скорость газа на выходе из дымовой трубы является определяющей характеристикой для выбора оптимальных параметров дымовой трубы.

Для удобства сравнения методики расчета основных параметров дымовых труб приведены в табл. 1.



## Сравнение методик по определению основных параметров

<b>Великобритания</b>	
<p>1. Расчет индекса загрязнения, м<sup>3</sup>/с:</p> $P_i = \frac{D}{(G_d - B_c)} \times 1000$ <p>2. Нескорректированная высота дымовой трубы <math>U_b</math>:</p> $U_b = 10^a \cdot P_i^b,$ <p>где для <math>Q \leq 1</math> МВт:</p> $a = -1,11 - 0,19 \cdot \log_{10} Q,$ $b = 0,49 + 0,005 \cdot \log_{10} Q;$ <p>и для <math>Q \geq 1</math> МВт:</p> $a = -0,84 - 0,1 \cdot \exp(Q^{0.31})$ $b = 0,46 + 0,011 \cdot \exp(Q^{0.32})$ <p>3. Динамическая составляющая движения выбрасываемых газов <math>M</math> (м<sup>4</sup>/с<sup>2</sup>)</p> $M = \frac{\rho_d \cdot \pi \cdot w^2 \cdot d^2}{\rho_a \cdot 4}$ <p>4. Высоту дымовой трубы <math>U_m</math></p> $\log_{10} U_m = x + (y \cdot \log_{10} P_i + z)^{0,5},$ <p>где:</p> $x = -3,7 + (\log_{10} M)^{0,9},$ $y = 5,9 - 0,624 \log_{10} M,$ <p>и</p> $z = 4,24 - 9,7 \cdot \log_{10} M + 1,47(\log_{10} M + 1,47(\log_{10} M)^2 - 0,07(\log_{10} M)^3)$ <p>5. Когда есть одно доминирующее здание, которое шире, чем высота, окончательная высота дымовой трубы <math>C</math></p> $C = H + 0,6(U + (2,5 \cdot H - U) \cdot (1 - A^{-U/H}))$ <p>В случаях, отличных от одиночных, широких зданий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выбираются все соответствующие здания, то есть те, которые находятся на расстоянии <math>5 U_m</math>, и записываются <math>H</math> и <math>B</math> для каждого здания.</li> <li>2. Оценивается <math>K</math> для каждого здания (меньшее из <math>H</math> или <math>B</math>).</li> <li>3. Рассчитывается <math>T</math> для каждого здания (<math>T = H + 1,5 K</math>).</li> <li>4. Находится <math>H_m</math> (наибольшее значение <math>H</math>).</li> <li>5. Находится <math>T_m</math> (наибольшее значение <math>T</math>).</li> <li>6. Если <math>U</math> больше, чем <math>T_m</math>, тогда <math>C = U</math> и коррекция высоты дымовой трубы не требуется.</li> <li>7. В противном случае рассчитывается скорректированная высота трубы, <math>C</math>, с использованием формулы:</li> </ol>	<p><math>P_i</math> – индекс загрязнения  <math>D</math> - скорость выброса загрязняющего вещества, в г/с;  <math>G_d</math> - концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;  <math>B_c</math> - фоновая концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества для конкретного района/области или ее эквивалент <math>B_e</math>, мг/м<sup>3</sup>;  <math>U_b</math> - нескорректированная высота дымовой трубы, м;  <math>a</math> и <math>b</math> – вспомогательные величины;  <math>Q</math> – тепло содержащееся в дымовых газах, МВт;  <math>\rho_d</math> и <math>\rho_a</math> плотности рассеиваемых газов и атмосферного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  <math>w</math> - скорость истечения газов, м/с;  <math>d</math> - диаметр устья трубы, м;  <math>V</math> - объемный расход истечения дымовых газов, м<sup>3</sup>/с;  <math>x, y, z</math> – вспомогательные величины;  <math>U</math> - нескорректированная высота дымовой трубы, меньшее из <math>U_m</math> или <math>U_b</math>, м,  <math>A = U_m / U_b</math>.  <math>H</math> - высота здания (измеряется до конька или другой наивысшей точки, без учета лифтов, резервуаров и других выступов менее 1% площади крыши), м;  <math>B</math> - ширина здания (измеряется под прямым углом к линии, соединяющей дымовую трубу и ближайшую точку), м;  <math>K</math> - меньшее из высоты здания <math>H</math> или ширины здания;  <math>T</math> - высота возмущенного потока над зданием, определяется как <math>H + 1,5K</math>.  <math>T_m</math> - максимальный <math>T</math> с учетом всех</p>

$C = H_m + (1 - H_m / T_m)(U + (T_m - U) \cdot (1 - A^{-U/H_m}))$		соответствующих зданий. $H_m$ - максимум $H$ с учетом всех соответствующих зданий. $C$ - окончательная скорректированная высота дымовой трубы.	
<b>США</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Не менее 65 метров при измерении от отметки уровня земли у основания дымовой трубы.</li> <li>• <math>2,5H</math> (для труб, построенных до 12 января 1979 г.), или <math>H + 1,5L</math> (для всех других дымовых труб).</li> <li>• Высота определяется с учетом атмосферной турбулентности в пределах пограничного слоя и вихревых эффектов, создаваемых застройкой.</li> </ul>		$H$ - высота самого здания или любой значимой соседней конструкции или сооружений, м; $L$ - меньшее из проектируемых высоты или ширины рассматриваемого зданиям.	
<b>Испания</b>			
1. Проверка условия применимости методики:  $\Delta T > 188 \cdot \frac{V^2}{H^2} \cdot \sqrt{S}$	$\Delta T$ - разница между температурой дымовых газов в устье дымовой трубы и средней температурой максимума самого теплого месяца. °C; $V$ - скорость дымовых газов, м/с; $H$ - Расчетная высота дымовой трубы, м; $S$ - Минимальное внутреннее сечение дымохода, м <sup>2</sup> .	$\delta t$ - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °C; $T_m$ - среднегодовая температура, °C; $h$ - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %.	Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это не так, то используется $T_m = 10$ .
2. Определение параметра $A$ – этот параметр представляет климатологические условия места, где расположена установка, и равен:  $A = 70 \cdot I_0,$ и $I_0 = \frac{\Delta T + 2\delta t}{T_m} + \frac{80}{h}$	$\delta t$ - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °C; $T_m$ - среднегодовая температура, °C; $h$ - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %.	Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это не так, то используется $T_m = 10$ .	Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это не так, то используется $T_m = 10$ .
3. В итоге высота дымовой трубы рассчитывается следующим образом:  $H = \sqrt{\frac{A \cdot Q \cdot F}{C_M}} \cdot \sqrt[3]{\frac{n}{v \cdot \Delta T}}$	$\Delta T$ - разница между температурой дымовых газов в устье дымовой трубы и средней температурой максимума самого теплого месяца. °C; $V$ - скорость дымовых газов, м/с; $H$ - Расчетная высота дымовой трубы, м; $S$ - Минимальное внутреннее сечение дымохода, м <sup>2</sup> . $\delta t$ - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °C; $T_m$ - среднегодовая температура, °C; $h$ - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %. Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это не так, то используется $T_m = 10$ . $H$ – расчетная высота дымовой трубы, м; $Q$ - максимальный расход загрязняющих веществ, кг/ч; $F$ - коэффициент, связанный со скоростью осаждения загрязняющих веществ в атмосфере. Для газообразных загрязнителей $F = 1$ , а для твердых частиц и других тяжелых примесей $F = 2$ ; $n$ - количество дымовых труб, расположенных на расстоянии менее $2 \cdot H$ по горизонтали от исследуемой дымовой трубы; $v$ - расход дымовых газов, м <sup>3</sup> /ч; $C_m$ - максимальная концентрация загрязняющих веществ на уровне земли, выражается в мг/м <sup>3</sup> (среднее значение за 24 часа).	$\delta t$ - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °C; $T_m$ - среднегодовая температура, °C; $h$ - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %.	Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °C. Если это не так, то используется $T_m = 10$ .
<b>Швеция</b>			
Правила разработанные Шведским метеорологический и гидрологический институтом (SHMI) для SEPA			
<b>Германия</b>			
Номограмма TA LUFT для определения высоты дымовой трубы или компьютерная программа BESMIN			
<b>Индия</b>			
Формула, разработанная CPCB и утвержденная правительством Индии: $H = 14 \cdot Q^{0,3}$	$H$ - физическая высота трубы, м; $Q$ – объемный расход SO <sub>2</sub> , кг/ч;		
Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 110 МВт [29]			
<b>Регион (время года)</b>	<b>Выведенная формула</b>	<b>Диапазон эмиссии SO<sub>2</sub> (кг/ч)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>

Матхура (летний сезон)	$H = 0,075Q - 85,6$	От 1800 до 3960	0,9984
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0887Q - 118,6$	От 1800 до 3960	0,9967
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,9201 \cdot Q^{0,5895}$	От 1800 до 3960	0,9972
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,3153 \cdot Q^{0,6895}$	От 1800 до 3060	0,9973
	$H = 7e - 12 \cdot Q^{3,7511}$	От 1800 до 3960	0,9933
Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 500 МВт [29]			
<b>Регион (время года)</b>	<b>Выведенная формула</b>	<b>Диапазон эмиссии SO<sub>2</sub> (кг/ч)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Матхура (летний сезон)	$H = 0,0589 \cdot Q - 143,3$	От 3600 до 7200	0,9956
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0656 \cdot Q - 180$	От 3600 до 7200	0,9945
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,3086 \cdot Q^{0,6619}$	От 3600 до 7560	0,991
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,0752 \cdot Q^{0,7846}$	От 4320 до 6660	0,9969
	$H = 4e - 19 \cdot Q^{5,2945}$	От 6660 до 7560	0,9912
<b>Китай</b>			
«Контроль загрязнения воздуха. Инженерные технические принципы» HJ2000-2010			

### Обсуждение

К положительным моментам в методике [2] можно отнести тот факт, что при расчете учитывается тепловая и динамическая составляющая, а также информации о выбросах в данном районе и ближайших источниках выбросов. В [2] и [8] на учитывается ландшафт, плотность и высота застройки.

В большинстве рассмотренных нормативных документах приведены рекомендации для установок малой и средней мощности, поэтому даются упрощенные расчеты и общие рекомендации по выбору оптимальных параметров. В свою очередь расчет рассеивания примеси для крупных установок проводится с помощью метеорологических моделей, компьютерного моделирования и испытаний в аэродинамической трубе, а затем утверждаться государственным регулирующим органом.

В результате аналитического обзора получены данные для разработки наиболее целесообразных направлений дальнейших научных исследований в области определения оптимальных параметров дымовых труб.

Одним из таких направлений может быть учет особенностей работы дымовых труб в переходной период к «Зеленой энергетике». Уже сейчас можно констатировать, что ряд стран, и особенно Германия, встали на путь практической реализации данного подхода. Им уже недостаточно такого экологически чистого вида топлива как природный газ. Они хотят получить топливо, при использовании которого не выбрасывается двуокись углерода. Таким топливом может стать водород. Причем не просто водород, а тот, при производстве которого не было выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу. Это может быть или «Атомный водород», произведенный путем электролиза воды за счет электроэнергии, полученной на АЭС, или «Зеленый водород», получаемый также путем электролиза воды, но за счет электроэнергии, получаемых с помощью возобновляемых источников энергии. Этот водород планируется в дальнейшем использовать в топливных элементах.

Однако в переходной период, который будет продолжаться еще несколько десятилетий, этот водород будет сжигаться в камерах сгорания газовых турбин (что уже реализуется), а также в котельных установках. Россия имеет хорошие возможности для выработки и поставки потребителям такого топлива.

Предполагается использовать для поставки водорода существующие газопроводы. По-видимому, это будет делаться за счет постепенного увеличения доли водорода в природном газе и дальнейшее сжигание такого топлива в энергетических установках. Для такого топлива потребуются корректировка условий сжигания, в т.ч. модернизация горелок, чтобы не допустить контакта водорода с металлом при высоких температурах в топке.

Продукты сгорания при этом будут насыщаться парами воды и оксидами азота. Изменение состава продуктов сгорания потребует учесть это при анализе надежности дымовых труб и выработке оптимальных условий их проектированию.

#### **Заключение**

Как и [1], [2] так и рассмотренные иностранные нормативные документы не учитывают важнейшие характеристики при определении оптимальных параметров дымовых труб. Российская методология выбора оптимальных параметров дымовой трубы, основанная Л.А. Рихтером [36] является передовой и в настоящее время. Эта методика получила развитие в работах [37-40]. Аналогичных исследований в зарубежных источниках не найдено, поставленные в них задачи актуальны и требуют дальнейшего развития.

#### **Литература**

1. Приказ Минстроя России от 14.12.2017 №1667/пр «об утверждении свода правил трубы промышленные дымовые. правила проектирования».
2. СП 375.1325800.2017. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования. М.: Изд-во стандартов, 2018.
3. Model Code for Steel Chimneys - the CICIND Chimney Standard, ISBN 1-902998-16-2, Revision 2010, Zürich, Switzerland.
4. Environment Act 1995 - Act Chapter 25 1995. Department of the Environment London. H.M.S.O.
5. Environmental Protection Act 1990, 1993. Technical Guidance Note (Dispersion) D1, Guidance's on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions, London: HMIP.
6. The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights (Department of the Environment, (1981)) London. H.M.S.O.
7. The Clean Air Act 1993/Act Chapter 25. 1993. Department of the Environment London. H.M.S.O.
8. EPA. "Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation) Revised," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-45014-80-023R, 1985.
9. EPA, "Guideline for Use of Fluid Modeling to Determine Good Engineering Practice Stack Height," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-450/4-81-003, July 1981.
10. Ronald L. Petersen «Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height» June 2015 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition At: Raleigh, NC
11. Greenway A.R., Cermak J.E., Petersen R.L and H.C. McCullough. "Physical Modeling Studies for GEP Stack Height Determinations," 74th Annual Meeting of the APCA, Paper No. 81-20.3, CEP80-81 JAP-JEC33, Philadelphia, Pennsylvania, June 21-26, 1981.
12. Halitsky J.A., Petersen R.L., Taylor S.D., et al. "Nearby Terrain Effects on a Good Engineering Practice Stack Height," paper to be presented at 79th Annual APCA Meeting in Minneapolis, Minnesota, 1986.
13. Petersen R.L., Parce D.K., West J.L., et al. "Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height," 86th Annual APCA Conference, Denver, CO, June 14-18, 1993.
14. Petersen R.L. "Fluid Modeling for Good Engineering Practice Stack Height at Homer City Generating Station," prepared for TRC Environmental Consultants, Inc., East Hartford, CT, by Cermak Peterka Petersen, Inc., Report No. 86-0338, October, 1987.
15. Snyder W.H. "Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion," USEPA, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, Research Triangle Park, North Carolina, Report No. EPA600/8-81-009, 1981.
16. EPA. AERSURFACE User's Guide, EPA-454/B-08-001, USEPA Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina, 2008.
17. Petersen R.L. and A. Beyer-Lout. Fluid Modeling Good Engineering Practice Stack Height Determination for the Rhineland Mill Stack S09, CPP Report 7835, October 2014.
18. Panofsky and Dutton. "Atmospheric Turbulence," John Wiley & Sons, Inc., 1984.
19. Cimorelli A.J., Perry S.G., Venkatram A., et al. "AERMOD: Description of Model Formulation," EPA-454/R-03-004, September 2004.
20. Petersen R.L. "Dispersion Comparability of the Wind Tunnel and Atmosphere for Adiabatic Boundary Layers with Uniform Roughness," Seventh Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Boulder, CO, November 12-15, 1985.
21. Thomas F.W., Carpenter S.B. & Gartrell F.E. (1963) Stacks-How High? Journal of the Air Pollution Control Association, 13:5, 198-204. doi: 10.1080/00022470.1963.10468165.

22. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal L 332.
23. Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. Ministry of Industry, Spain.
24. Sweden Environmental Protection Agency regulations amending the Environmental Protection Agency regulations (NFS 2002:26) on air emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides and dust from combustion installations with a rated thermal input of 50 MW or more, of 31st March 2010).
25. Technical Instructions on Air Quality Control- TA Luft of 24 July 2002. Federal Ministry of Environment, Germany.
26. Central Board for the prevention and control of water pollution, New Delhi, (1985). A method to determine the minimum stack height, Control of Urban Pollution Series: CUPS/13/1984-85.
27. Central Pollution Control Board, (1994). Report on Design and operating parameters of Electrostatic Precipitators, Programme Objective Series: PROBES/45/1992, September 1994, pp.3, 20-22.
28. Central Pollution Control Board, (1996). Pollution Control Acts, Rules, and Notifications issued thereunder, Pollution Control Series: PCL/2/1992 (V.1).
29. George KV, Chalapati Rao CV, Labhsetwar P K and Hasan M. Z. 2002 “Minimum Stack Height Formula for Coal Based Thermal Power Plant in Northern India” J. Institut. Engineers (India), Environ. Engg. Div. 2002.V. 82. pp 31-34.
30. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2011: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2011. Chinese.
31. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2003: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2003. Chinese.
32. National Standard of the People’s Republic of China. HJ 2000-2010: Technical guidelines for air pollution control projects; 2010. Chinese.
33. Von Hohenleiten H.L. & Kent R.H. (1954) Economic and Engineering.
34. Considerations in the Design of Stacks for Good Gas Dispersion, Air Repair, 3:3, 195-200, doi:10.1080/00966665.1954.10467628.
35. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control) JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau Final Draft (June 2016).
36. Рихтер Л.А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы. М., «Энергия», 1975, 312 с.
37. Zroichikov N.A., Saparov M.I., Gribkov A.M., Mirsalikhov K.M. A general-purpose procedure for the calculation of the optimum gas velocity in gas exhaust ducts of stacks at thermal power stations. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. № 3. pp. 157-164. doi: 10.1134/S0040601520030064
38. Zroichikov N.A., Gribkov A.M., Saparov M.I., Mirsalikhov K.M. Analysis of the Benefits of TPP’s Three-Barrel Smokestacks. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. №9 pp. 610–616. doi: 10.1134/S0040601520090116.
39. Gribkov A.M., Chichirova N.D., Fedorenkov D.I. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. №10 pp. 724–732. doi: 10.1134/S0040601520100043.
40. Gribkov A.M., Zroichikov N.A. & Prokhorov V.B. Plume trajectory formation under stack tip self-enveloping. Thermal Engineering. 2020. Т. 64. №10 pp, 745–752 (2017). doi: 10.1134/S0040601517100032.

#### Авторы публикации

**Мирсалихов Кирилл Маратович** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Грибков Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет.

**Чичирова Наталья Дмитриевна** – д-р хим. наук, профессор, действительный член РАЕН, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный деятель

науки РТ, эксперт фонда «Сколково» руководитель научной школы «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии процессов и производств в теплоэнергетике», заведующая кафедрой «Тепловые электрические станции» и Директор института Теплоэнергетики, Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Prikaz Ministroja Rossii ot 14.12.2017 №1667/pr "Ob utverzhenii svoda pravil "truby promyshlennye dymovye. pravila proektirovanija (Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 14, 2017 No. 1667 / On the approval of the set of rules" industrial smoke pipes. design rules "
2. SP 375.1325800.2017. *Truby promyshlennye dymovye. Pravila proektirovanija*. M.: Izdvo standartov, 2018. (SP 375.1325800.2017. Industrial chimneys. Design rules. M.: Publishing house of standards, 2018.)
3. *Model Code for Steel Chimneys - the CICIND Chimney Standard*, ISBN 1-902998-16-2, Revision 2010, Zürich, Switzerland.
4. Environment Act 1995 - Act Chapter 25 1995 - Department of the Environment London. H.M.S.O.
5. Environmental Protection Act 1990, 1993. *Technical Guidance Note (Dispersion) D1, Guidance's on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions*, London: HMIP.
6. *The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights* (Department of the Environment, (1981)) London. H.M.S.O.
7. The Clean Air Act 1993 - Act Chapter 25 1993 - Department of the Environment London. H.M.S.O.
8. EPA, "Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation) Revised," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-45014-80-023R, 1985.
9. EPA, "Guideline for Use of Fluid Modeling to Determine Good Engineering Practice Stack Height," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-450/4-81-003, July 1981.
10. Ronald L. Petersen *Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height June*. 2015 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition At: Raleigh, NC
11. Greenway AR., J.E. Cermak, R. L. Petersen, and H.C. McCullough, "Physical Modeling Studies for GEP Stack Height Determinations," 74th Annual Meeting of the APCA, Paper No. 81-20.3, CEP80-81 JAP-JEC33, Philadelphia, Pennsylvania, June 21-26, 1981.
12. Halitsky JA, Petersen RL, Taylor SD, et al. "Nearby Terrain Effects on a Good Engineering Practice Stack Height," paper to be presented at 79th Annual APCA Meeting in Minneapolis, Minnesota, 1986.
13. Petersen RL, Parce DK, West JL, et al. "Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height," 86th Annual AWMA Conference, Denver, CO, June 14-18, 1993.
14. Petersen RL. "Fluid Modeling for Good Engineering Practice Stack Height at Homer City Generating Station," prepared for TRC Environmental Consultants, Inc., East Hartford, CT, by Cermak Peterka Petersen, Inc., Report No. 86-0338, October, 1987.
15. Snyder W.H. "Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion," USEPA, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, Research Triangle Park, North Carolina, Report No. EPA600/8-81-009, 1981.
16. EPA. AERSURFACE User's Guide, EPA-454/B-08-001, USEPA Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina, 2008.
17. Petersen RL. and A Beyer-Lout. *Fluid Modeling Good Engineering Practice Stack Height Determination for the Rhinelander Mill Stack S09*, CPP Report 7835, October 2014.
18. Panofsky and Dutton. "Atmospheric Turbulence," John Wiley & Sons, Inc., 1984.
19. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, et al. "AERMOD: Description of Model Formulation," EPA-454/R-03-004, September 2004.
20. Petersen RL. "Dispersion Comparability of the Wind Tunnel and Atmosphere for Adiabatic Boundary Layers with Uniform Roughness," Seventh Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Boulder, CO, November 12-15, 1985.
21. Thomas FW., Carpenter S.B. & Gartrell F.E. (1963) Stacks-How High? *Journal of the Air Pollution Control Association*, 13:5, 198-204, doi: 10.1080/00022470.1963.10468165.
22. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, *Official Journal L 332*.
23. *Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de*

grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. Ministry of Industry, Spain.

24. Sweden Environmental Protection Agency regulations amending the Environmental Protection Agency regulations (NFS 2002:26) on air emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides and dust from combustion installations with a rated thermal input of 50 MW or more, of 31st March 2010.

25. Technical Instructions on Air Quality Control- TA Luft of 24 July 2002. Federal Ministry of Environment, Germany.

26. Central Board for the prevention and control of water pollution, New Delhi, (1985). A method to determine the minimum stack height, Control of Urban Pollution Series: CUPS/13/1984-85.

27. Central Pollution Control Board, (1994). Report on Design and operating parameters of Electrostatic Precipitators, Programme Objective Series: PROBES/45/1992, September 1994, pp.3, 20-22.

28. Central Pollution Control Board, (1996). Pollution Control Acts, Rules, and Notifications issued thereunder, Pollution Control Series: PCL/2/1992 (V.1).

29. George KV, Chalapati Rao C V, Labhsetwar PK and Hasan M.Z. “Minimum Stack Height Formula for Coal Based Thermal Power Plant in Northern India. *J. Institut. Engineers (India)*, Environ. Engg. Div., 2002;82:31-34.

30. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2011: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2011. Chinese.

31. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2003: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2003. Chinese.

32. National Standard of the People’s Republic of China. HJ 2000-2010: Technical guidelines for air pollution control projects; 2010. Chinese.

33. Von Hohenleiten HL. & Kent RH (1954) *Economic and Engineering*.

34. Considerations in the Design of Stacks for Good Gas Dispersion, Air Repair, 3:3, 195-200, doi:10.1080/00966665.1954.10467628.

35. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control) JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau Final Draft (June 2016).

36. Rihter L.A. Teplovye jelektricheskie stancii i zashhita atmosfery. Thermal power plants and protection of the atmosphere. M., «Jenergija», 1975, 312 pages.

37. Zroichikov NA, Saparov MI, Gribov AM, Mirsalikhov K.M. A general-purpose procedure for the calculation of the optimum gas velocity in gas exhaust ducts of stacks at thermal power stations. *Thermal Engineering*. 2020;67(3):157-164. doi: 10.1134/S0040601520030064.

38. Zroichikov NA, Gribov AM, Saparov MI, Mirsalikhov KM. Analysis of the Benefits of TPP’s Three-Barrel Smokestacks. *Thermal Engineering*. 2020;67(9):610–616. doi: 10.1134/S0040601520090116.

39. Gribov AM, Chichirova ND, Fedorenkov DI. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. *Thermal Engineering*. 2020;67(10):724–732. doi: 10.1134/S0040601520100043.

40. Gribov AM, Zroichikov NA. & Prokhorov VB. Plume trajectory formation under stack tip self-enveloping. *Thermal Engineering*. 2020;64(10):745–752 (2017). doi: 10.1134/S0040601517100032.

#### **Authors of the publication**

**Kirill M. Mirsalikhov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Aleksandr M. Gribov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Natalia D. Chichirova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено**

**01 марта 2021г.**

**Отредактировано**

**05 марта 2021г.**

**Принято**

**05 марта 2021г.**