

УДК 539.3

**Хамитов Тагир Камилевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [tagirkx@yandex.ru](mailto:tagirkx@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Хайруллин Булат Тахирович**

главный инженер

E-mail: [b.khairullin@skjbs.ru](mailto:b.khairullin@skjbs.ru)

**ООО «ЖБС инжиниринг»**

Адрес организации: 420081, Россия, г. Казань, ул. Г. Кариева, д. 10

**Аюпов Инсаф Ильгамович**

ведущий специалист

E-mail: [fridern@gmail.com](mailto:fridern@gmail.com)

**ООО «Идельдорпроект»**

Адрес организации: 420029, Россия, г. Казань, ул. Дружбы, д. 14

### Расчет несущей способности дымовой трубы при демонтаже

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – оценка прочности железобетонной дымовой трубы при демонтаже методом валки.

*Результаты.* Представлены результаты моделирования потери несущей способности монолитной железобетонной дымовой трубы при демонтаже методом направленной валки. Приводятся два варианта расчета для определения размера проема в стволе трубы: а) труба рассматривается как внецентренно-сжатая упругая колонна; б) труба моделировалась как тонкая коническая оболочка переменного сечения в пакете ЛИРА. Исследовалось напряженно-деформированное состояние трубы в зависимости от ширины проема в стволе от собственного веса, а также с учетом натяжения 17 т от экскаватора. Расчеты выполнялись как в геометрически и физически линейной постановке, так и с учетом нелинейности. Проект производства работ для демонтажа дымовой трубы был составлен с учетом результатов выполненных расчетов и рекомендаций.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в разработке рекомендаций для безопасного демонтажа дымовых труб и других подобных высотных сооружений.

**Ключевые слова:** дымовая труба, демонтаж, валка, ширина проема, ствол трубы.

#### Введение

В связи с реконструкцией отделения спекания предприятия АО «Метакхим», расположенного по адресу: Ленинградская область, г. Волхов, Кировский проспект, д. 20, возникла необходимость в сносе монолитной железобетонной дымовой трубы (рис. 1а). Труба высотой 120 м была введена в эксплуатацию в 1952 г. Демонтаж трубы до отметки +68.000 м производился альпинистами методом последовательной разборки (рис. 1б). В непосредственной близости от демонтируемой трубы находились здания предприятия, поэтому валку трубы требовалось производить направленно. Возможный сектор валки составлял не более 45° (рис. 2). Сроки, поставленные Заказчиком перед строительной организацией, выполняющей демонтаж трубы, не позволяли применить метод взрыва [1, 2] в связи с долгой процедурой получения разрешительной документации от уполномоченных служб и более высокой стоимостью работ. Перед строителями возникла проблема в обосновании расчетами размера проема в стволе трубы для ее валки.

Ствол трубы по высоте имеет форму усеченного конуса с уклоном образующей наружной грани ствола 1,5 %. Класс бетона ствола трубы – В15. Фундамент трубы – из монолитного железобетона, круглый в плане. Диаметр фундамента – 20 м, глубина заложения – 2,9 м. Собственный вес бетона трубы вместе с футеровкой – 1500 т. Железобетонный ствол имеет следующие геометрические размеры: высота – 68 м,

внешний радиус у основания – 5,26 м, внутренний – 4,86 м. Толщина ствола на высоте 0-10 м составляет 0,42 м, на высоте 10-17,5 м – 0,37 м, на высоте 17,5-30 м – 0,35 м, на высоте 30-40 м – 0,32 м, на высоте 40-50 м – 0,3 м, на высоте 50-60 м – 0,27 м, на высоте 60-68 м – 0,25 м. На отметке  $\pm 0.000$  м в стволе выполнены два проема для газоходов, на высоте 5-7 м выполнено круглое технологическое отверстие диаметром 2,5 м (рис. 1в). Перед началом работ предполагается отбить защитный слой бетона и срезать рабочую арматуру по периметру ствола на отметке проема.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Общие виды дымовой трубы:  
а) до начала демонтажа; б) после разборки ствола до отм. +68.000 м;  
в) расширение проема в стволе с помощью гидромолота; г) падение трубы от собственного веса (иллюстрация авторов)

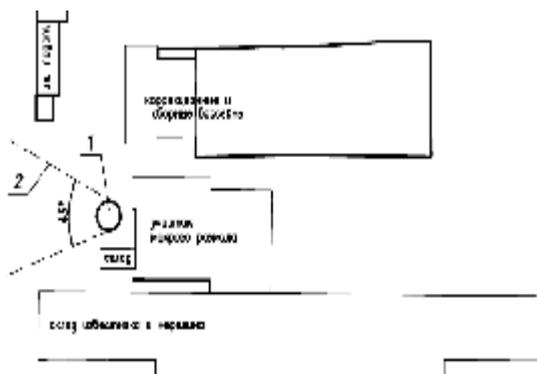


Рис. 2. Генплан площадки демонтажа трубы:  
 1 – обрушаемая труба; 2 – граница сектора валки трубы с углом 45° (иллюстрация авторов)

В сети интернет можно найти много видеоматериала по обрушению дымовых труб. В научной и нормативной литературе также имеется много работ, посвященных демонтажу сооружений методом взрыва [1-9]. Однако в них отсутствует методика расчета прочности конструкций при их обрушении. В данной работе предпринята попытка расчета предельной несущей способности трубы с целью определения необходимого размера проема в стволе. Вопрос сейсмического эффекта от падения трубы на расположенные вблизи сектора валки здания не рассматривается.

**Расчет трубы как внецентренно сжатой колонны.**

Трубу рассмотрим как жестко заделанную бетонную колонну тонкостенного сечения при внецентренном сжатии от собственного веса  $P = 1500$  т (рис. 3а). Определим угол  $\alpha$  или ширину  $l$  проема в стволе (рис. 3б) в предположении упругой работы бетона из условий прочности:

$$\frac{Pe}{W_p} - \frac{P}{A} \leq R_{bn}, \tag{1}$$

$$\frac{Pe}{W_c} + \frac{P}{A} \leq R_{bn}, \tag{2}$$

где  $A = 2rta$  – площадь ослабленного сечения;  
 $t = 0,4$  м,  $r = 5,06$  м – толщина и средний радиус ствола у основания;  
 $e = r \frac{\sin \alpha}{a}$  – эксцентриситет приложения нагрузки  $P$  (координата центра тяжести сечения);  
 $W_p = \frac{J_x}{r - e}$  – момент сопротивления растянутой зоны сечения;  
 $W_c = \frac{J_x}{e - r \cos \alpha}$  – момент сопротивления сжатой зоны сечения;  
 $J_x = 0,5tr^3 \frac{\alpha}{\epsilon} + \sin 2\alpha - \frac{4}{a} \sin^2 \alpha \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}}$  – наименьший момент инерции сечения;  
 $R_{bn} = 11$  МПа,  $R_{bn} = 1,15$  МПа – нормативные сопротивления бетона класса В15 на сжатие и растяжение.

Условия (1) и (2) с учетом вышеприведенных формул примут вид:

$$\sin \alpha \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{\sin \alpha}{a} \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}} = 0,25 + \frac{a}{\ddot{o}} \frac{\alpha}{\epsilon} + \sin 2\alpha - \frac{4}{a} \sin^2 \alpha \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}}, \tag{3}$$

$$b(a - \sin \alpha \cos \alpha) = a \frac{\alpha}{\epsilon} + \sin 2\alpha - \frac{4}{a} \sin^2 \alpha \frac{\ddot{o}}{\ddot{o}}, \tag{4}$$

где  $a = \frac{2P}{R_{bn}tr} \gg 12,89$ ,  $b = \frac{P}{R_{bn}tr} \gg 0,674$ .

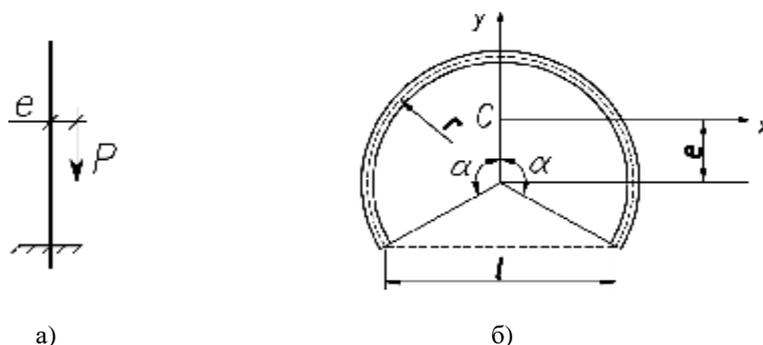


Рис. 3. К расчету ствола трубы:

а) расчетная схема; б) сечение трубы у основания (иллюстрация авторов)

Решая численно нелинейные уравнения (3) и (4), находим два значения для углов  $\alpha_1 = 106^\circ$  и  $\alpha_2 = 93,5^\circ$ . За расчетное значение принимаем наибольший  $\alpha = 106^\circ$ , что означает разрушение бетона в растянутой зоне сечения. Ширина проема:

$$l = 2r \sin \alpha = 9,73 \text{ м.}$$

### Результаты моделирования на ПК ЛИРА

Расчетная схема трубы принималась как тонкая коническая оболочка переменного сечения. В пакете ЛИРА исследовалось напряженно-деформированное состояние (НДС) от собственного веса трубы в зависимости от ширины проема в стволе, а также с учетом натяжения 17 т от экскаватора. Ветровая нагрузка не учитывалась. Задача решалась как в геометрически и физически линейной постановке, так и с учетом нелинейности. За критерий разрушения бетона принималось достижение в бетоне нормативных сопротивлений в сжатой либо растянутой зонах. Некоторые результаты расчета представлены на рис. 4.

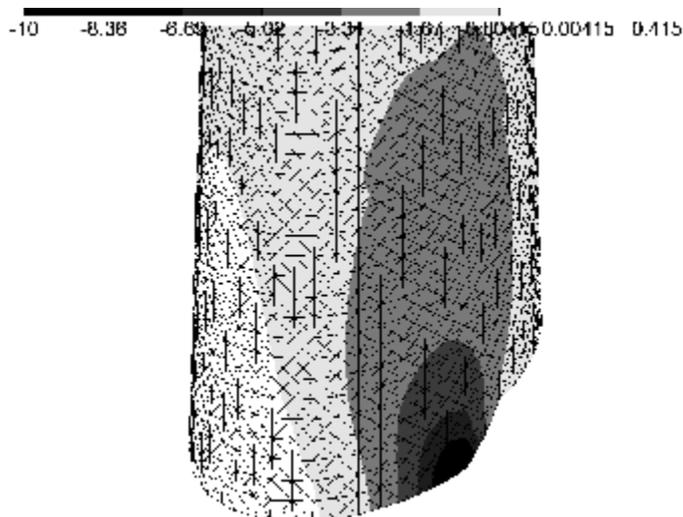


Рис. 4. Изополя нормальных напряжений в стволе трубы в геометрически и физически линейной постановке (иллюстрация авторов)

На изополях нормальных напряжений видно, что разрушение бетона ствола происходит в сжатой зоне – наибольшая концентрация напряжений образуется у границы проема. Расчеты показали, что натяжение троса от экскаватора весьма незначительно влияет на НДС трубы, поэтому применить натяжение можно непосредственно перед валкой. В таблице приведено сравнение максимальных нормальных напряжений в стволе в зависимости от ширины проема для двух расчетных моделей.

Таблица

Расчетная модель трубы	Ширина проема, м	Максимальные Напряжения в сжатой зоне сечения, МПа	Максимальные Напряжения в растянутой зоне сечения, МПа
Упругая балка	9,73	7,2	1,15
Оболочка в геометрически и физически линейной постановке	10,03	10,26	0,16
Оболочка в геометрически и физически нелинейной постановке	9,95	11,02	0,41

### Результаты обрушения трубы

Расширение проема в стволе производилось с помощью экскаватора с гидромолотом, крен верхнего конца трубы контролировался с помощью теодолита. Рабочая арматура по периметру ствола полностью срезалась с помощью газовой резки. Непосредственно перед валкой площадь сечения трубы составляла 40 % от первоначальной площади. Горизонтальное отклонение верхнего конца трубы к началу валки составляло около 0,19 м. Для предотвращения разрушения подземных коммуникаций и уменьшения сейсмического эффекта на ближайшие здания на площадке падения были выполнены насыпи из грунта высотой 1-3 м для амортизации удара. В результате труба обрушилась с небольшим отклонением от предполагаемого направления в пределах участка валки (рис. 1г). Повреждения подземных коммуникаций и трещины на стенах зданий, расположенных вблизи сектора валки, не зафиксированы.

### Заключение

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Фактическая ширина проема в стволе трубы оказалась больше расчетного значения примерно на 10 %. Основными факторами, влияющими на отклонение теории и опыта, видимо, являются фактическая прочность бетона и реальные геометрические характеристики сечения ствола трубы.
2. При расчете прочности дымовых труб и других подобных высотных сооружений при демонтаже методом валки за расчетную схему следует принять оболочечную модель.

### Список библиографических ссылок

1. Ельшин А. М., Ижорин М. Н., Жолудев В. С., Овчаренко Е. Г. Дымовые трубы. М. : Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Зеленин М. Ю., Хабибулин В. Р., Гущенко Д. Е., Барон В. Л., Ганопольский М. И. Взрывные работы по направленному обрушению железобетонной трубы высотой 150 метров в г. Ижевск (Удмуртия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 6. С. 149–160.
3. Лазутин Н. В., Матвеев Ю. В., Мартыненко Г. Н. Причины обрушения дымовой железобетонной трубы № 3 Березниковской ТЭЦ-2 // Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2015. № 5. С. 73–75.
4. ООО «УСЭР-Инжиниринг» // URL: <http://www.user-ekb.ru/index.php?main=newsmain&id=100012&pg=2> (дата обращения: 11.07.2019).
5. MATEC Web of Conferences 170, 03019 (2018) // URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817003019> (дата обращения: 04.07.2019).
6. Мирсаяпов Ильшат Т., Тамразян А. Г. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 50–56.
7. Мирсаяпов Ильшат Т., Тамразян А. Г. К расчету железобетонных конструкций на выносливость // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 19–23.

8. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Прочность бетона при смятии // Архитектура и строительство. 2010. № 4. С. 75–78.
9. Etkin M. B., Azarkovich A. E., Etkin A. M. Systems approach to safety of preservable entities in the planning blasting operations // Power Technology and Engineering. 2001. vol. 35. № 10. P. 535–544.
10. Bayliss C. R., Langley K. F. Dismantling Techniques // Nuclear Decommissioning, Waste Management, and Environmental Site Remediation. 2003. P. 99–111.

**Khamitov Tagir Kamilevich**

candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [tagirkx@yandex.ru](mailto:tagirkx@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Khairullin Bulat Tahirovich**

chief engineer

E-mail: [b.khairullin@skjbs.ru](mailto:b.khairullin@skjbs.ru)

**ООО «JBS engineering»**

The organization address: 420081, Russia, Kazan, G. Kariev st., 10

**Ayupov Insaf Ihamovich**

leading specialist

E-mail: [fridern@gmail.com](mailto:fridern@gmail.com)

**ООО «Ideldorproject»**

The organization address: 420029, Russia, Kazan, Druzhby st., 14

**Calculation of the carrying capacity of the chimney during dismantling****Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is the strength assessment of reinforced concrete chimney during dismantling by roll method.

*Results.* The results of modeling the loss of bearing capacity of a monolithic reinforced concrete chimney during the dismantling by the method of directional rolls are presented. Two variants of the calculation for determining the size of the opening in the trunk of the pipe: a) the pipe is considered as an eccentric-compressed elastic column; b) the pipe was modeled as a thin conical shell of variable cross-section in the LIRA package. The stress-strain state of the pipe was investigated depending on the depth of the hole in the trunk of its own weight, as well as taking into account the tension of 17 tons from the excavator. The calculations were performed both in geometric and physical linear formulation and taking into account the nonlinearity. The results of the calculations and recommendations were taken into account in the preparation of the project of works for the dismantling of the chimney.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is to develop recommendations for the safe dismantling of chimneys and other similar high-rise structures.

**Keywords:** chimney, dismantling, felling, the size of the opening, the barrel of the pipe.

**References**

1. Elshin A. M., Egorin M. N., Zholudev, V. S., Ovcharenko E. G. Chimneys. M. : Stroyizdat, 2001. 296 p.
2. Zelenin M. Y., Khabibulin V. R., Guchenko D. E., Baron V. L., Ganopolsky M. I. Blasting by a directed collapse of a reinforced concrete pipe with a height of 150 m in Izhevsk (Udmurtia) // Mountain information-analytical Bulletin. 2016. № 6. P. 149–160.
3. Lazutin N. V., Matveev Yu. V., Martynenko G. N. Reasons for the collapse of the reinforced concrete chimney № 3 Berezniki CHP-2 // Newsletter of the Federal service for environmental, technological and nuclear supervision. 2015. № 5. P. 73–75.

4. ООО «USER-Engineering» // URL: <http://www.user-ekb.ru/index.php?main=newsmain&id=100012&pg=2> (reference date: 11.07.2019).
5. MATEC Web of Conferences 170, 03019 (2018) // URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817003019> (reference date: 04.07.2019).
6. Mirsayapov Ilshat T., Tamrazyan A. G. To development of scientific bases of the theory of endurance of reinforced concrete structures // Industrial and civil engineering. 2017. № 1. P. 50–56.
7. Mirsayapov Ilshat T., Tamrazyan A. G. To development of scientific bases of the theory of endurance of reinforced concrete structures // Industrial and civil engineering. 2016. № 11. P. 19–23.
8. Sokolov B. S., Antakov A. B. Concrete crushing Strength // Architecture and construction. 2010. № 4. P. 75–78.
9. Etkin M. B., Azarkovich A. E., Etkin A. M. Systems approach to safety of preservable entities in the planning blasting operations // Power Technology and Engineering. 2001. vol. 35. № 10. P. 535–544.
10. Bayliss C. R., Langley K. F. Dismantling Techniques // Nuclear Decommissioning, Waste Management, and Environmental Site Remediation. 2003. P. 99–111.