

УДК 624.04

ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КОНСТРУКЦИЙ ШАХТНО-ПЕРЕСЫПНОЙ ИЗВЕСТКОВОЙ ПЕЧИВасильев¹ М.В., Белавский² В.А.

Институт «Академия строительства и архитектуры» ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,
адрес: 295034 г. Симферополь, ул. Киевская, 181
E-mail: ¹ wmv_sapr@mail.ru, ² belavsky@mail.ru

Аннотация. Выполнена оценка несущей способности конструкций шахтно-пересыпной известковой печи с учетом возникших в процессе эксплуатации повреждений. Произошло частичное обрушение участка огнеупорной футеровки, в результате повысилась температура ствола печи. Исследования выполнены для определения необходимости усиления конструкций и оценки эффективности варианта усиления, предложенного заказчиком.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние листовых стальных конструкций с учетом влияния повышенной температуры.

Материалы и методы: исследования выполнены на базе численных моделей в программном комплексе «ЛИРА-САПР» методом конечных элементов.

Результаты: была определена максимальная температура, при которой возможна нормальная эксплуатация печи. Предложен вариант усиления ствола печи для повышения надежности конструкции.

Выводы: проведенные исследования показали возможность эксплуатации печи при условии, что температура ствола не превысит 400°C. Предложенный заказчиком вариант усиления стержневыми элементами существенного результата не дал. Несущая способность повышалась на 4-11% в зависимости от температуры нагрева. В качестве способа усиления было рекомендовано рассмотреть вариант со сталебетонной обоймой.

Ключевые слова: моделирование, сооружение, температура, конечные элементы, несущая способность.

ВВЕДЕНИЕ

Кальциевая известь производится из известняка или мела, содержащих не более 5% карбоната магния. Обжиг этих карбонатных пород осуществляется в шахтных или вращающихся печах при температуре 1000–1250°C с получением извести [3].

Крупнейшими потребителями извести являются металлургические предприятия и строительная отрасль. Основные направления применения извести:

- в металлургии при выплавке стали для удаления соединений фосфора, серы и других примесей требуется 70 кг высокорекреационной извести I сорта на 1 т металла;

- в строительной отрасли для производства силикатных изделий (кирпича и газобетонных блоков) в сырьевую массу добавляют 7–10% извести II или III сорта; для производства сухих строительных смесей и полимерцементных материалов используется гашеная известь в количестве 3–8%;

- в химической промышленности известь используется для производства кальцинированной соды, карбида кальция, хлорной извести, бертолетовой соли, синтетического каучука и др.;

Обжиг известняка и мела осуществляется в шахтных или вращающихся печах. Тип и конструкция печей определяются в первую очередь качеством исходного сырья. В шахтных печах обжигаются твердые породы известняка узкой фракции с размерами кусков не менее 30–40 мм. Чаще всего используют фракции 40–80 и 70–140 мм. Прочность известняка должна быть не менее

30 МПа. Не обжигаются в шахтных печах карбонатные породы, подверженные растрескиванию при нагревании, а также известняки, склонные к образованию в печи сваров (спеков). Преимущества шахтных печей: относительно низкий расход топлива; компактное размещение печи на небольшой площади; высокая степень обжига (95–98%); длительный срок службы футеровки (до 8 лет) [3].

В настоящее время на известковых комбинатах проводится модернизация шахтных печей, связанная с мероприятиями направленными на повышение качества извести и экономии тепла при обжиге сырья [2].

В случае необходимости продления срока эксплуатации ствола шахтной печи следует рассмотреть варианты усиления конструкции при повреждении футеровки.

Моделирование несущих конструкций шахтнопересыпной известковой печи (ствола печи) с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР» было выполнено для оценки технического состояния металлоконструкций ствола печи и возможности ее дальнейшей эксплуатации без усиления, а при необходимости последней для оценки эффективности предложенного заказчиком варианта. Необходимость расчета обусловлена фактом частичного обрушения участка огнеупорной футеровки печи от отм. +18,5 м до отм. +37,4 м, шириной от 0,8 до 1,2 м по западной стороне, вследствие чего наблюдается повышение наружных температур стенки ствола печи, возможный максимум – свыше 450 °C.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ПЕЧИ, НАГРУЗОК И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Конструктивно шахтно-пересыпная известковая печь представляет собой трубу с конусообразным сужением в нижней части. Материал ствола сталь 09Г2С, толщина 20мм, наружный диаметр цилиндрической части ствола от отм. +19,525м до отм. +42.000м -7510мм; наружный диаметр низа конуса печи на отм. + 15,050 — 4560мм, верха конуса на отм. +19,525 - 7510мм.

Ствол является несущей конструкцией для устройства подачи шихты в печь (два скиповых подъемника, устройство загрузки состоит из двух конусов и распределительной лопаты), в нижней части расположено устройство валковой выгрузки, принудительная подача воздуха в печь - снизу. Внутренняя обечайка ствола футерована огнеупорным кирпичом: цилиндрическая часть отм. +19,525- +42.000м - кирпич тип ШТ, МЛУ по ГОСТ

24704-2015, ГОСТ 5040-2015; коническая часть отм.+1 5,050 - +19,525 - кирпич ШБ, ШПД по ГОСТ 390-2018, ГОСТ 1598-2018. Толщина футеровки - 350мм. Скиповый подъемник состоит из двух частей – нижней (основной) и верхней (разгрузочной). Нижняя часть состоит из двух мостов (рельсовых путей), разнесенных «в свету» на 1.0м. Между мостами выполнена ходовая лестница. Каждый мост состоит из двух плоских ферм, соединенных связями (раскосного типа) по нижним поясам и распорками — по верхним поясам. В фермах в качестве нижних поясов включены ходовые балки скипов. По нижним поясам ферм выполнен поддон - из стальных листов. По боковым граням ферм установлены сетки. Верхняя (разгрузочная) часть состоит из ходовых балок, а также из опорных подкосов. Подкосы верхней части оперты на конструкции площадки для обслуживания печей на отм. +45.000. Между собой из плоскости подкосы развязаны элементами решетки. Общий вид стальных конструкций печи представлен на рис. 1.

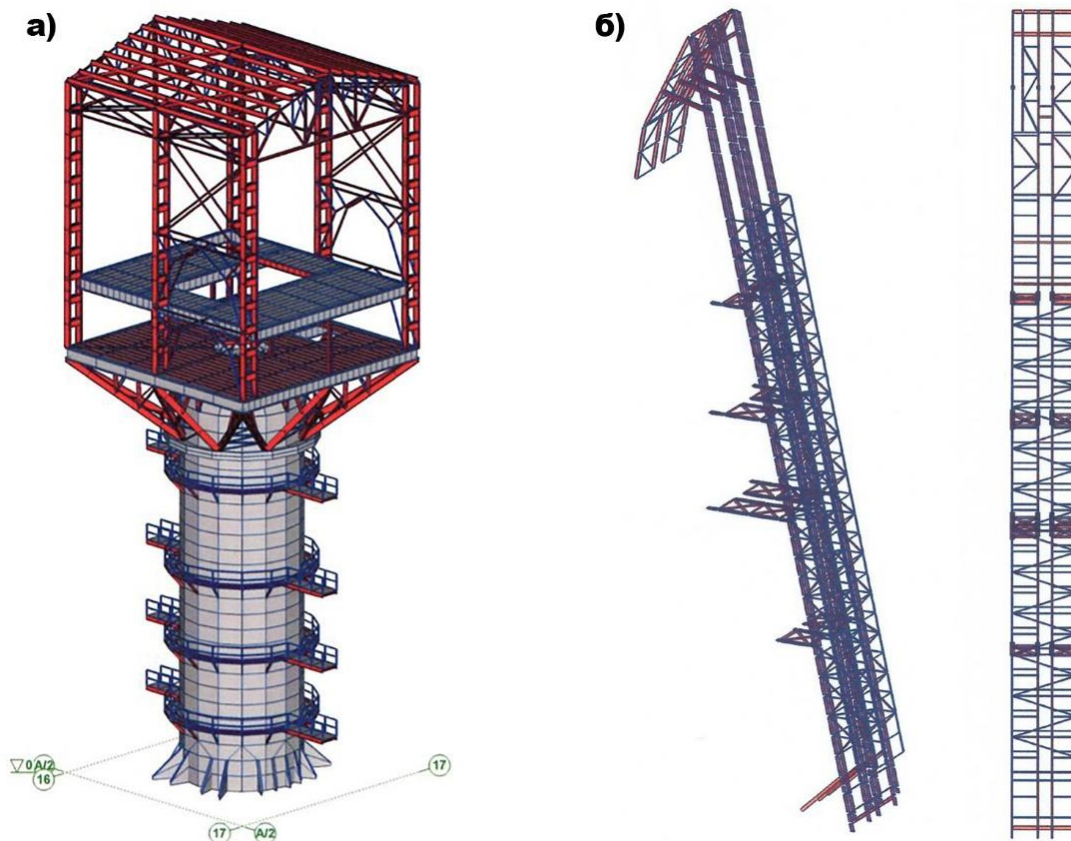


Рис. 1. Общий вид конструкций печи:

а) конструкция ствола печи с площадками обслуживания; б) конструкции для движения скипового подъемника.

Fig. 1. General view of limestone kiln

а) construction of limestone kiln with service platforms; б) construction for skip lift movement

Расчет был выполнен на основное сочетание нагрузок, при задании нагрузок были выделены следующие загрузки:

1. Собственный вес конструкций, постоянные нагрузки от веса шатровой надстройки над печью и от веса скипового подъемника.

2. Постоянное нагружение от действия горизонтального давления на вертикальные стенки печи от загрузки шихты известняка.

3. Длительно действующая часть временной нагрузки на конструкции балок ходовых мостиков, расположенных по периметру ствола печи.

4. Кратковременная часть временной нагрузки на конструкции балок ходовых мостиков, расположенных по периметру ствола печи.

В соответствии с исходными данными нагрузка от футеровки передается на железобетонный постамент на отм. 11,86-15,05. В данном расчете не учитывали нагрузку от футеровки ниже отм. +35. Общий вес футеровки в зоне подогрева составил 1690 кН. Расчетное значение составило 1860 кН. Данная нагрузка равномерно распределена по узлам модели, в уровне соответствующим отм. +35 сооружения.

По данным заказчика вес шатровой надстройки над печью составляет 1330 кН. С учетом коэффициента надежности по нагрузке, который составляет 1,1, расчетное значение составит 1463 кН. В модели шатровую надстройку не моделировали, а учитывали как равномерно распределенную постоянную нагрузку, приложенную к верхним узлам элементов, моделирующим ствол печи.

Равномерно распределенную нагрузку на конструкции ходовых мостиков (участки обслуживания и ремонта оборудования в производственных помещениях) определяли согласно по п. 11 табл. 8.3. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Значения нагрузки представлены в таблице 1.

Нормативное горизонтальное давление на вертикальные стенки печи для случая загрузки до уровня верха печи при горизонтальной поверхности сыпучего определяем по формуле (21) [3]:

$$p_{\Gamma}^H = k\gamma h,$$

где k – коэффициент бокового давления сыпучего, γ – объемный вес для известняка, в соответствии с приложением 2 [3] составляет 16-20 кПа, h – высота засыпки.

В соответствии с приложением 2 [3] угол внутреннего трения для известняка находится в пределах 29-51°, соответственно коэффициент бокового давления составит 0.36-0.12.

Расчетное давление определяем с учетом коэффициента перегрузки, который в соответствии с п. 3.3 [3] принимаем равным 1,2.

При полной загрузке печи от. отм. 42 м до отм. 18.5 м максимальное нормативное нормальное давление на вертикальные стенки составит 169,2 кПа.

Вертикальная нагрузка от шихты, передаваемая на стенки за счет трения учтена только для части сооружения выше отм. +35. Высота стенки 6,64 м. Коэффициент трения для известняка, в соответствии с приложением 2 [3] $f=0.65$.

Горизонтальное давление на глубине 6,64 м составит 47,8 кПа.

Вертикальная нагрузка от трения на глубине 6,64 м составит 31 кПа.

Учитывая треугольную эпюру давления и длину окружности печи, суммарная нормативная нагрузка составит 680 кН, расчетное значение 816 кН.

Вес конструкций скипового подъемника составляет 342,5 кН. Расчетное значение составит 360 кН. Нагрузка приложена как равномерно распределенная к элементам, моделирующим мосты подъемника, погонная нагрузка составит 2,2 кН/м

Таблица 1. Нагрузки, приложенные к расчетной модели
Table 1. Loads applied to the design model

Наименование	Нормативное значение	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетное значение
Постоянные нагрузки			
Нагрузки на направляющие от веса скипового подъемника, кН			53,3
Временные нагрузки			
Равномерно распределенная переменная нагрузка на конструкции балок ходовых мостиков (участки обслуживания и ремонта оборудования в производственных помещениях), кН/м ² , в т.ч.	1,5	1,3	2,4
– длительная, кН/м ²	0,53	1,3	0,68
– кратковременная, кН/м ²	0,98	1,3	1,27

Были рассмотрены два варианта расчетной модели сооружения:

- без конструкций усиления (рис.2а);
- с учетом усиления ствола печи стальными конструкциями (рис.2б).

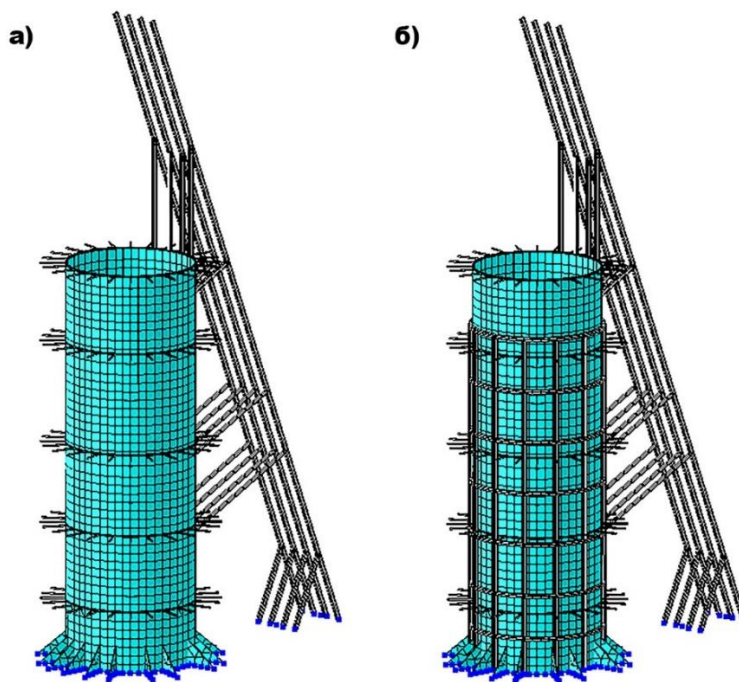


Рис. 2. Общий вид расчетной модели:

а) без усиления; б) с учетом усиления ствола печи стальными конструкциями.

Fig. 2. General view of design model of limestone kiln

a) without reinforcement; б) taking into account the reinforcement of steel structures.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Для дальнейшего анализа рассматривали нормальные, касательные и главные напряжения в элементах, моделирующих ствол печи, от расчетного сочетания нагрузок.

В соответствии с требованиями СП 16.13330.2017 Стальные конструкции были выполнены проверки прочности и устойчивости листовой конструкции цилиндрической стальной оболочки печи.

Расчет на прочность листовых конструкций (оболочек вращения), находящихся в безмоментном напряженном состоянии, выполняли по формуле (148) СП 16.13330.2017 Стальные конструкции:

$$\frac{1}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2},$$

где σ_x и σ_y – нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям; γ_c – коэффициент условий работы конструкций, назначаемый в соответствии с требованиями СП 43.13330 Сооружения промышленных предприятий.

При этом абсолютные значения главных напряжений должны быть не более значений расчетных сопротивлений, умноженных на γ_c .

Расчет на устойчивость замкнутых круговых цилиндрических оболочек вращения, равномерно сжатых параллельно образующим, выполняли по

формуле (154) СП 16.13330.2017 Стальные конструкции:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1} \gamma_c} \leq 1,$$

где σ_1 – расчетное напряжение в оболочке; $\sigma_{cr,1}$ – критическое напряжение, равное меньшему из значений ψR_y или cEt/r (здесь r – радиус срединной поверхности оболочки; t – толщина оболочки) при $r/t < 300$; при $r/t > 300$ $\sigma_{cr,1} = cEt/r$.

Значения коэффициентов ψ при $0 < r/t < 300$ следует определять по формуле (155) СП 16.13330.2017 Стальные конструкции:

$$\psi = 0,97 - (0,00025 + 0,95 R_y / E) r / t.$$

Значения коэффициента c следует определять по таблице 34 СП 16.13330.2017 Стальные конструкции.

Минимальные значения прочности и устойчивости при различной степени температурного воздействия представлены в таблице 2. Для всех рассчитанных сечений элементов стальных конструкций выводятся результаты проверок по прочности и устойчивости (по I предельному состоянию). Результаты представлены в виде процентов использования сечения в сравнении с предельной несущей способностью по той или иной проверке.

Таблица 2. Результаты проверки прочности и устойчивости
Table 2. Strength and stability test results

Вид расчетной модели	Расчетная температура, °С	Вид проверки		
		% использования по нормальным напряжениям	% использования по главным напряжениям	% использования по устойчивости
Без усиления	20	25,8	46,4	61,9
	100	28,6	51,5	67,2
	200	30,7	55,3	71,2
	300	33,5	60,5	76,7
	400	41,5	75,1	92,2
	450	71,3	129,3	150,4
С усилением	20	22,1	41,6	55,6
	100	24,4	45,9	60,0
	200	26,2	49,2	63,3
	300	28,5	53,6	67,9
	400	35,3	66,0	81,0
	450	60,2	112,8	131,0

Полученные результаты показали, что несущая способность ствола печи обеспечена при температуре до 400°С. Предложенный вариант усиления стойками сечением в виде швеллера № 24 и отдельными кольцами сечением в виде двутавра не оказывает существенного влияния на несущую способность ствола печи. Увеличение несущей способности составило от 4 до 11%.

Для повышения надежности при эксплуатации конструкций ствола обжиговой печи было рекомендовано рассмотреть вариант усиления стальной обоймой. Ствол обжиговой печи рекомендуется усилить стальными обоймами,

устанавливаемыми на расстоянии 60...80 мм от существующих стенок ствола обжиговой печи. Промежутки между обоймой и стенкой заполняются бетоном класса В15 с тщательным вибрированием. Стальные обоймы высотой 1,5 м по окружности состояются из четырех элементов с сопряжением их болтами через приваренные к листам обечайек уголки. Обечайки свариваются вертикальными и горизонтальными швами толщиной 4 мм. К обечайкам по их осям на всю высоту привариваются диафрагмы из стальных листов толщиной 12 мм с горизонтальными ребрами толщиной 10 мм через 1 м по высоте (рис. 3).

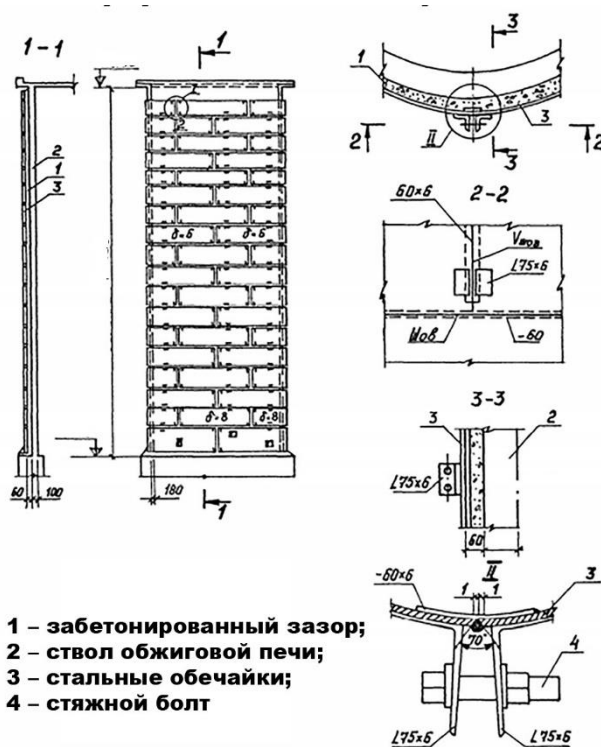


Рис. 3. Усиление ствола обжиговой печи стальной обоймой.
Fig. 3. Reinforcement of steel clip limestone kiln

ВЫВОДЫ

Выполнен расчет шести вариантов модели конструкции ствола шахтно-пересыпной известковой печи при нагреве в диапазоне температур от 20 до 450 °С с проверками прочности листовых конструкций по нормальным напряжениям, по главным напряжениям и на устойчивость замкнутых круговых цилиндрических оболочек вращения, равномерно сжатых параллельно образующим.

В результате расчета были получены расчетные сочетания нагрузок для всех элементов, моделирующих стальную цилиндрическую оболочку печи. В ходе анализа результатов расчета установлено, что условия прочности при проверке прочности листовых конструкций нормальным напряжениям перестают выполняться при нагреве свыше 400°С.

Предложенный заказчиком вариант усиления стержневыми элементами существенного результата не дал. Несущая способность повышалась на 4-11% в зависимости от температуры нагрева. В качестве способа усиления было рекомендовано рассмотреть вариант со сталебетонной обоймой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1: Нестеров А.В., Датукашвили Д.О. Производство кальциевой извести в России // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 52-59.
2. Нестеров А.В., Батыжев Д.З. Новая жизнь шахтных печей // Строительные материалы. – 2015. – № 3. – С. 49-52.
3. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. — 200 с.

REFERENCES

1. Nesterov A.V., Datukashvili D.O. Production of calcium lime in Russia // Construction materials. – 2017. – № 3. – Pp. 52-59.
2. Nesterov A.V., Batyzhev D.Z. New life of shaft furnaces // Building materials. – 2015. – № 3. – P. 49-52.
3. Guidelines for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers / Lenpromstroyproekt. – M.: Stroyizdat, 1983. – 200 p.

THE DETERIORATION IMPACT TO STRESS-STRAIN CONDITIONS FOR THE FILLING HOIST STRUCTURE OF LIMESTONE KILN.

Vasiliev¹ M.V., Belavsky² V.A

Academy of Construction and Architecture «V. I. Vernadsky Crimean Federal University»,
Kievskaya St. 181, Simferopol, Republic of Crimea, 295034,
E-mail: ¹ wmv_sapr@mail.ru, ² belavsky@mail.ru

Abstract. The assessment of the load-bearing capacity of the structures of a mine-filled lime kiln was carried out, taking into account the damage that occurred during operation. There was a partial collapse of the refractory lining section. As a result, the temperature of the furnace barrel increased. The studies were carried out to determine the need to strengthen the structures and evaluate the effectiveness of the reinforcement option proposed by the customer.

Subject: Stress-strain state of sheet steel structures taking into account the influence of elevated temperature.

Materials and methods: The research was carried out on the basis of numerical models in the software package "LIRA-SAPR" by the finite element method.

Results: The maximum temperature at which normal operation of the furnace is possible has been determined. A variant of strengthening the furnace barrel to increase the reliability of the structure is proposed.

Conclusions: The conducted studies have proved the possibility of operating the furnace, provided that the temperature of the barrel does not exceed 400°C. The option of reinforcement with rod elements proposed by the customer did not give a significant result. The load-bearing capacity increased by 4-11% depending on the heating temperature. As a method of reinforcement, it was recommended to consider the option with a steel-concrete clip.

Key words: modeling, construction, temperature, finite elements, bearing capacity.