

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ АГРЕГАТА СТЕКЛОВАРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Ихно, С.О. Титков

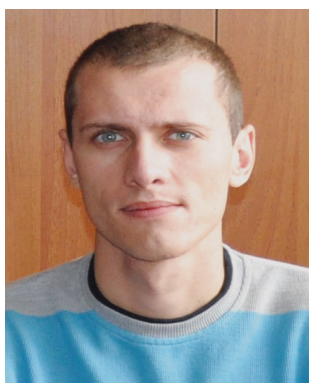
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**Аннотация.** Описана методика построения расчетной схемы стекловаренной печи при вводе ее в эксплуатацию. Пространственная модель расчета максимально приближена к реальной конструкции объекта. Составлены РСН для каждого из этапов введения печи в работу. Получены численные значения действительного НДС металлического каркаса печи в период ввода в эксплуатацию. На основе экспериментальных данных проведен сравнительный анализ полученных значений со значениями аналитического расчёта модели печи в ПК ЛИРА-САПР.

**Ключевые слова:** расчетная модель, металлический каркас, стекловаренная печь, нагрузки, расчетные сочетания, напряженно-деформированное состояние, деформация сечения, кручение



*Ихно Анна  
Владимировна*



*Титков  
Сергей Олегович*

Разработка уточнённой расчётной модели необходима для выполнения сравнительного анализа экспериментальных и численных значений НДС несущих металлических конструкций обвязки стекловаренной печи при вводе в эксплуатацию.

Предпосылкой для выбора данной тематики послужила проблема деформирования колонн обвязки металлического каркаса в процессе эксплуатации в связи с некорректным регулированием тяжёлой колонн обвязки ванной стекловаренной печи.

В качестве модели была выбрана средняя ванная стекловаренная печь со съёмом стекломассы 100 т/сутки. Печь регенеративная, непрерывного действия, с подковообразным направлением пламени, размерами в плане варочной части 15,5 × 8,2 м, с отдельной подвеской свода и стен газопламенного пространства. Действие распора свода при повышении температуры в период «выводки» воспринимается тяжёлыми, установленными на колоннах рам каркаса обвязки, верхнее и нижнее защемление колонн жесткое. Конструкция каркаса в варочной части насчитывает 9 плоских поперечных рам и две пары продольных рам с гибкой регулировкой у торцевых стен. Футеровка верхнего строения печи выполнена из огнеупорного материала с поперечными деформационными швами для релаксации кладки во время становления температурного режима. Нижнее строение печи состоит из конструкции днища печи, образованное балочной системой [1, 2] и несущих опорных колонн круглого сечения.

Для анализа работы конструкций каркаса на этапе введения печи в эксплуатацию построена объёмная расчетная модель системы верхнего и нижнего строения печи с учетом футеровочной части. Реализация модели осуществлена в программном комплексе Лира САПР 2013. Для построения таких элементов, как колонн днища, связей, продольных балок днища, поперечных балок днища, колонн обвязки печи, балок обвязки печи, тяжёлой (рис. 1), использовался тип конечных элементов КЭ10 (библиотека КЭ) Универсальный пространственный стержневой КЭ [3,4]. Для построения листа металла (днище печи) 8, балки лафета 9, свода печи варочной части 10 и выработочной 11 (рис. 2) применялись такие КЭ элементы: КЭ 41 (библиотека КЭ) Универсальный прямоугольный КЭ оболочки. Для построения стен днища применялись объёмные элементы Тип 34 Универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ и 36 (библиотека КЭ). Универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ

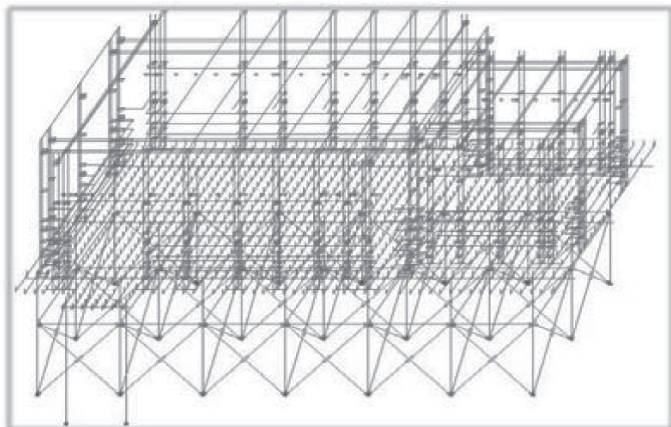


Рис. 1. Фрагмент расчётной схемы (КЭ 10)

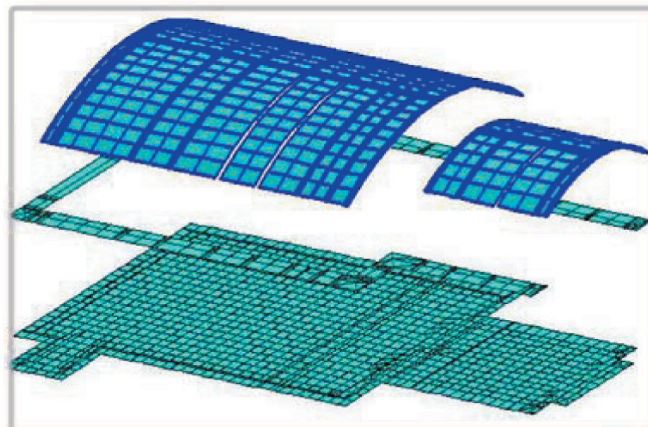


Рис. 2. Фрагмент расчётной схемы (КЭ 41, 42, 44)

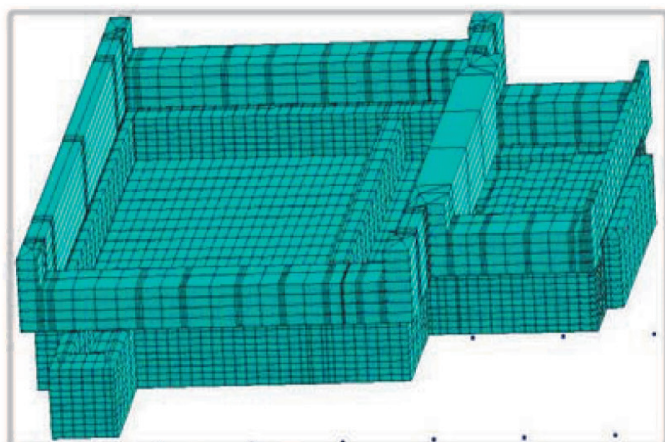


Рис. 3. Фрагмент расчётной схемы (КЭ 34, 36)

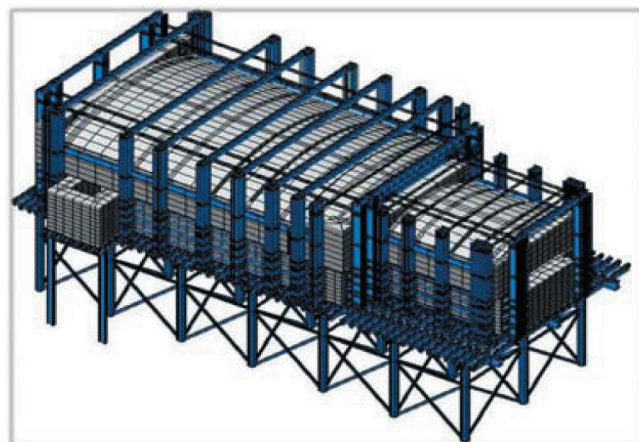


Рис. 4. Визуализация расчётной схемы печи

(рис. 3, 4). В расчетной схеме компенсационные зазоры футеровочной части бассейна не учитывались, т. к. они компенсируются за счет линейного расширения огнеупорных слоев. Компенсационные швы при этом назначаются строго в соответствии с линейным расширением каждого слоя футеровки [5-7]. При повышении температуры в рабочей камере печи при «выводке» и до момента начала подачи шихты стенки кладки работают совместно. Это допущение предусматривает отсутствие температурной нагрузки на стены варочного бассейна, т. к. швы предусмотрены для снятия напряжения в кладке от температурного расширения материала.

Важнейшим функциональным назначением работы тяжей (рис. 5, 6) в модели является сброс крутящего момента в колоннах обвязки с помощью своевременного регулирования и соответствующего центрирования колонны, включение тяжа с вышеизложенными температурными графиками (площадки стационарного температурного режима).

Тяж выполнен из болта М30, стали 40Х «Селект», класса прочности 12.9, длиной 500 мм. Жесткость элемента в расчетной модели задана численным опи-

санием с типом конечного элемента 10 (универсальный стержень).

Общее количество в расчётной схеме КЭ: стержневых элементов – 5454; объёмных (массив) – 11 008; пластин – 2459. Итого: 18 921. Количество узлов – 17 747. Общее количество неизвестных в расчетной схеме составляет 68 446.

#### Моделирование технологического процесса

Температура является основным фактором при вводе печи в эксплуатацию, ее наращивание ведется строго в соответствии с графиком «выводки» печи [8, 9]. Для полного отображения влияния технологического цикла на металлоконструкции были созданы сочетания нагрузок, которые появляются на различных этапах ввода печи в эксплуатацию. Особенностью расчёта является моделирование температурных режимов при вводе печи в эксплуатацию и регулирование НДС каркаса с использованием конструкции тяжей. Для реализации особенностей эксплуатации к сформированной расчетной схеме прикладывались такие нагрузки: собственный вес конструкций, давление стекломассы, температура внутри печи и на конструкциях (рис. 7, 8).



Рис. 5. Тяж в реальной конструкции

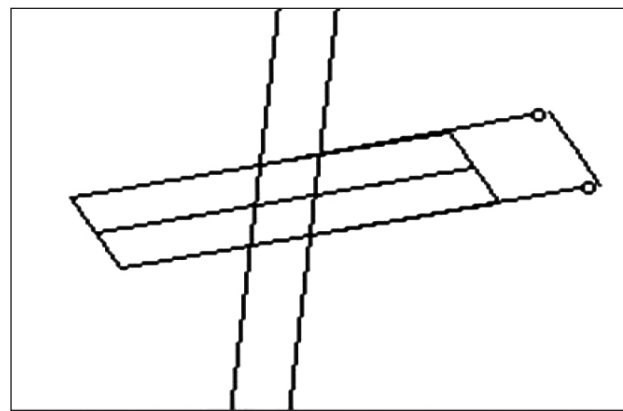


Рис. 6. Тяж в расчетной схеме

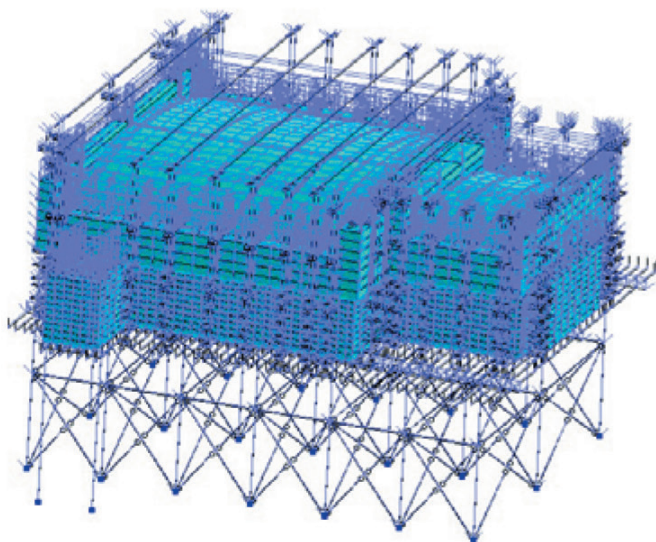


Рис. 7. Собственный вес в расчётной схеме

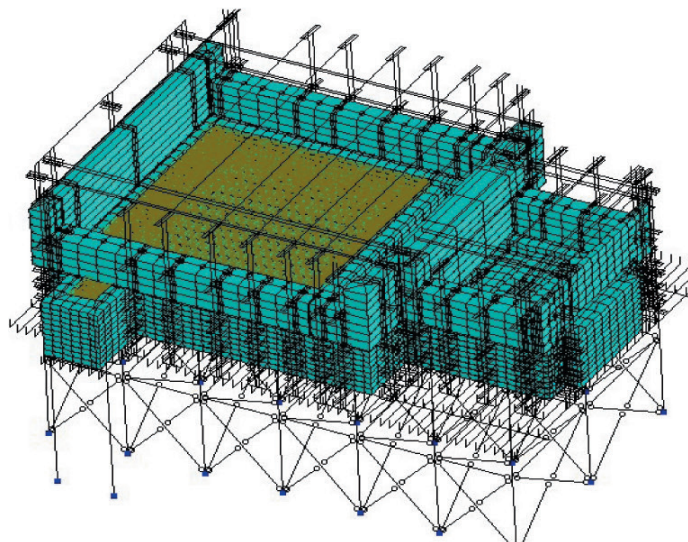


Рис. 8. Давление расплава стекломассы на расчётной схеме

На первом этапе к расчетной схеме прикладывается лишь нагрузка от собственного веса конструкций и материалов. Далее в соответствии с технологическим процессом происходит прогрев печи, при этом происходит расширение огнеупорных материалов [10-12], что в свою очередь ведет к увеличению стрелы арки свода.

При изменении стрелы свода печи в сооружении происходит перераспределение усилий в конструкциях. Это влияние будет наблюдаться до полного прогрева печи (до 1540 °С). Так как огнеупор прогревается неравномерно, то на графике присутствуют площадки выдержки огнеупора при одной температуре для полного равномерного его прогрева. После чего температуру в печи продолжают повышать до следующей площадки выдержки – 120, 245, 380, 840, 1200, 1560 °С.

Далее сочетания нагрузок строятся таким образом: собственный вес конструкций и материалов плюс температура на определенном участке выдержки печи, которая прикладывается к своду печи.

Температурная нагрузка прикладывается к оболочкам в местной системе координат по направлению оси Z. Также вводится значение коэффициента температурного расширения огнеупорного материала. Коэффициент находится по справочным данным и имеет нелинейную зависимость расширения от температуры. Для введения в расчет точного коэффициента расширения материала найден коэффициент для каждого градуса от 1 °С до 1600 °С и усреднен, тем самым нелинейный расчет переведен в линейный. Так как температура по всей длине печи распределяется неравномерно, соответственно на определенных участках с температурной разницей материал будет расширяться неравномерно и стрела арки свода также будет неодинакова на всех участках. Конструктивно между участками с различными температурами предусмотрены деформационные швы. Исходя из этого, свод печи принимается не как однородная целостная конструкция с приложением одного и того же температурного воздействия, а как 5 различных

конструкций. На каждый отдельный участок свода прикладываются различные температурные воздействия. Показатели температурных воздействий считаны с термопар, установленных в швах на своде печи по всей длине при введении печи в эксплуатацию. После полного прогрева печи в нее порционно загружается шихта. Загруженная шихта принимается как нагрузка, равномерно распределенная по дну варочного бассейна. При температурной обработке шихта расплавляется и превращается в стекломассу, которая в свою очередь оказывает давление на стены варочного бассейна. Из этого следует, что внутри печи нужно прикладывать не только равномерно распределенную нагрузку, но и гидростатическую нагрузку, действующую на стены бассейна печи.

Для объективности оценки влияния этой нагрузки и взаимной увязки с технологическим процес-

сом процесс заполнения печи стекломассой разбит на 7 этапов. Первые три этапа – это заполнение стекломассой основного варочного бассейна печи. Остальные 4 этапа – заполнение остальных технологических частей печи стекломассой.

Для наглядности составлена матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи (рис. 9).

Постепенно к собственному весу (1) суммируется температурная нагрузка на свод печи (отдельно посекционно) (2–7). По достижению 1540 °С на контрольной термопаре добавляется нагрузка от стекломассы (8–14). Таким образом, 1+7+8, 1+7+9, 1+7+..... 15–20 – температурные нагрузки на остальные конструктивные элементы футеровки печи. 21–26 – температурная нагрузка на элементы металлического каркаса обвязки (колонны каркаса,

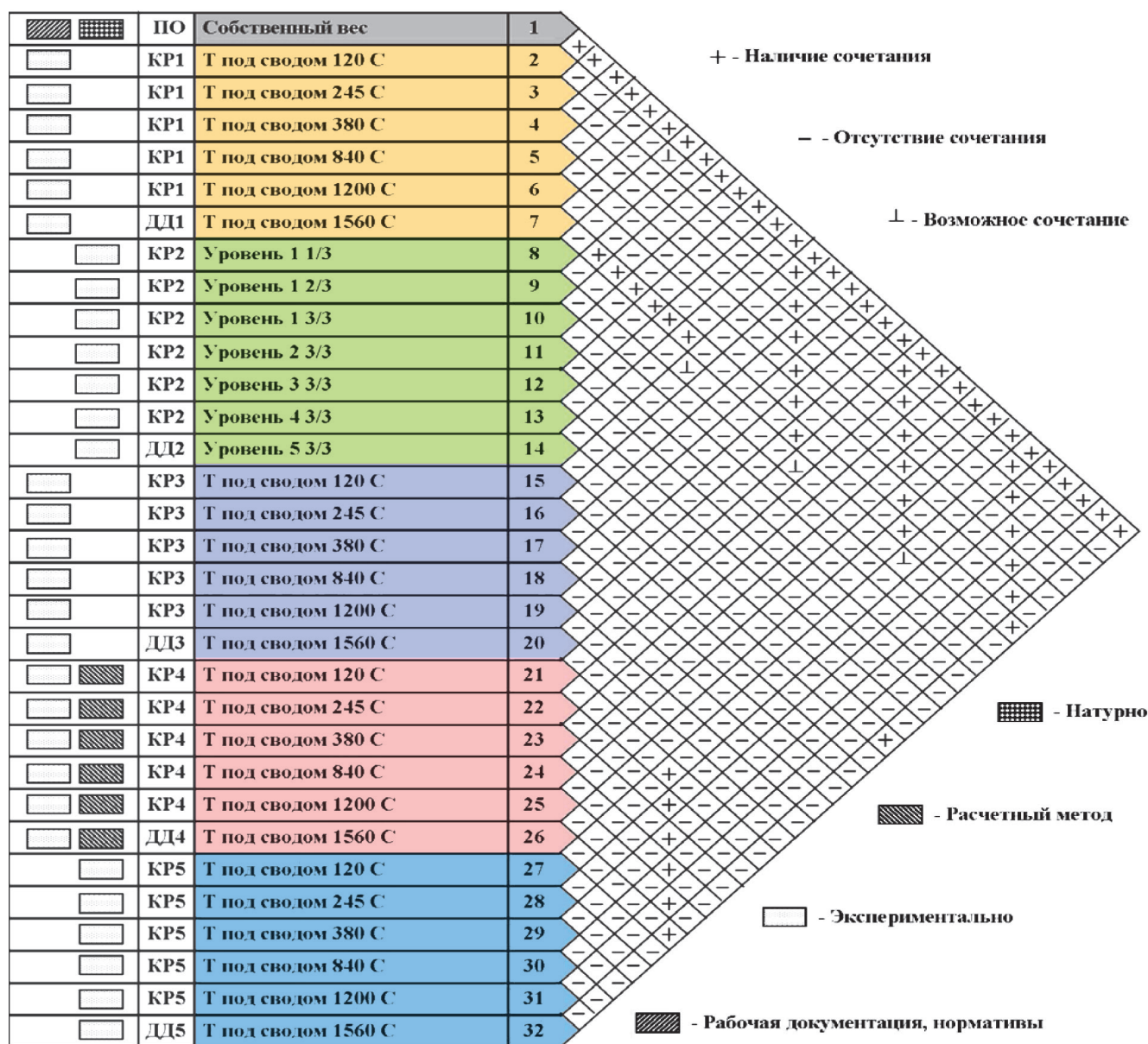


Рис. 9. Матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи

тяжи, лафет, продольные и поперечные балки свода, металлическая система днища). 27–32 – регулирование свода роспуском тяжей. И так, при температуре в печи 380 °С – 1+17+23+29 – гидростатическое давление стекломассы в этом случае отсутствует, т. к. ее подача начинается с температуры в камере печи 1560 °С. Температурные нагрузки до 1560 °С считаются кратковременными (КР1, КР3, КР4), длительнодействующими при установившихся 1560 °С считаются нагрузки (ДД1, ДД3, ДД4), (ДД2) и затяжка тяжей свода (ДД5). Всего матрица насчитывает 66 сочетаний, из них – 4 маловероятных, связанных с технологией «выводки» при наполненном стекломассой бассейне.

#### Результаты расчета

Расчет на указанные нагрузки и воздействия выполнен в линейной постановке. Проведен анализ результатов, и для более корректного анализа НДС исследуемого объекта создана дополнительная расчетная схема. Представлены изополю касательных напряжений, полученные в ходе расчета без учета регулировки (рис. 10) и с учетом регулировки тяжей (рис. 11). Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений моментов показал расхождения менее 1,5 %.

По результатам экспериментальных исследований, подтвержденных теоретическим анализом (сходимость 99 %), подтверждена высокая эффективность использования в системе каркаса обвязки тяжей-компенсаторов, снижающих крутящий момент в колонне.

#### Методика редуцирования напряжений в колонне

Основным положением в проектировании тяжа является корректное назначение его жесткостных характеристик, позволяющее регулировать податливость соединения в заданных пределах. По предложенной методике ослабление тяжей в расчетной

модели варьируется изменением жесткостной характеристики тяжа по закону Гука:

$$\frac{\Delta x}{X} = \frac{N}{EA}, \text{ где } N - \text{усилие в тяже, кН;}$$

$\Delta x$  – геометрическое изменение длины тяжа, мм;  
 $X$  – длина тяжа, мм.

На рисунке 13 представлен график роста напряжений в колонне каркаса с включением механизма регулировки тяжей.

#### ВЫВОДЫ

Составлены РСН для каждой температурной площадки этапов ввода печи в эксплуатацию. По результатам расчета выявлена депланация сечения колонны каркаса обвязки ванной стекловаренной печи. Выявлен и разработан способ регулирования НДС в колоннах каркаса при разработке расчетной модели печи, который показал хорошую сходимость с экспериментальными данными (99 %).

Сравнение экспериментальных данных (от 5,72 кНм до 112,82 кНм) и численных данных (от 5,8 кНм до 112,75 кНм), проводившееся на всём диапазоне температур, подтверждает корректность созданной расчётной схемы. Сходимость результатов подтверждается на всех позициях.

Предложенная методика проектирования металлических каркасов ванн стекловаренных печей позволяет поэтапно осуществлять проектирование и управление напряженно-деформированным состоянием системы при «выводке» агрегата в проектный режим с учетом технологических приемов при эксплуатации объекта.

В качестве рекомендаций по устранению явления депланации предлагается разработанный способ

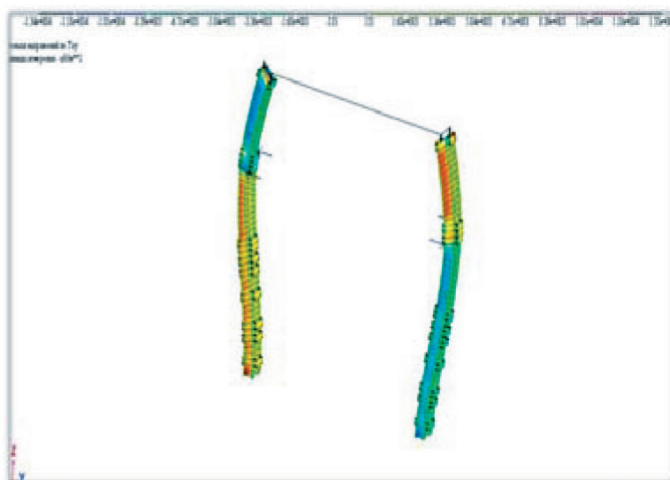


Рис. 10. Изополю напряжений  $\tau_{xy}$  в колоннах рамы без учёта регулировки тяжей

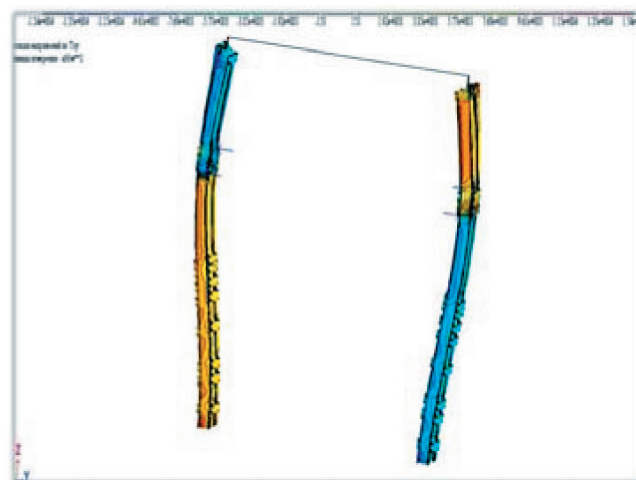


Рис. 11. Изополю напряжений  $\tau_{xy}$  в колоннах рамы с учётом регулировки тяжей

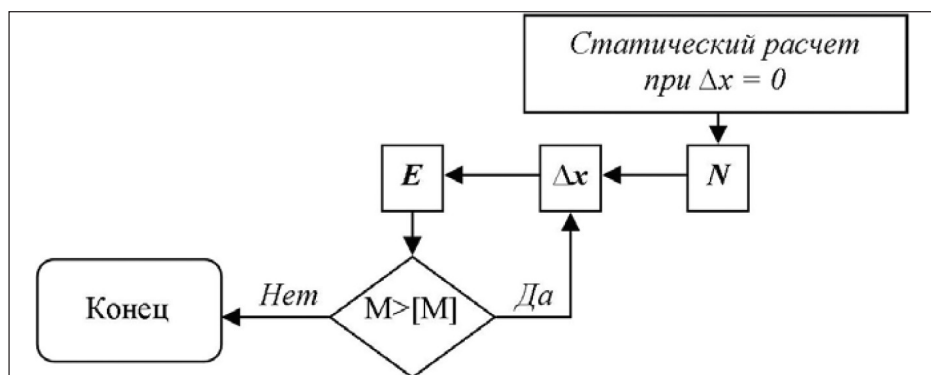


Рис. 12. Алгоритм учета регулировки тяжей в расчетной схеме

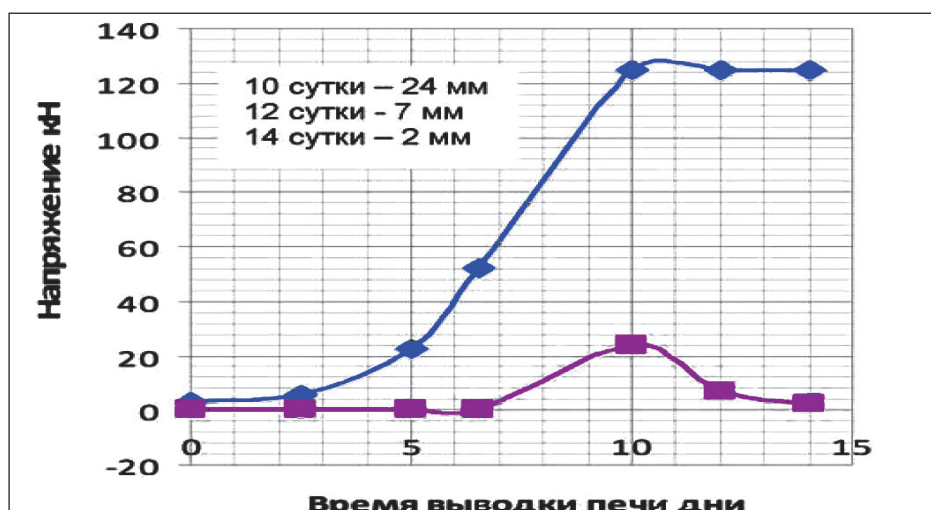


Рис. 13. Напряжения в колоннах рамы с учетом регулировки тяжей

регулирования НДС в колоннах методом роспуска тяжей свода печи, что обеспечивает снижение значения деформации колонны на 2,9 % и понижение эквивалентных напряжений (на 10 %).

**Список литературы:**

1. Anna Ihno. Results of field researches of a compact furnace for rolling sheet glass [Текст] / Anna Ihno // Металлические конструкции. – 2014. – № 3. – С. 151–158. – 20 т.
2. Anna Ihno. The calculation system of the construction of the glass furnace bottom [Текст] / Anna Ihno // Металлические конструкции. – 2014. – № 4. – С. 203–208. – 20 т.
3. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галагер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
4. Городецкий, Д.А. Программный комплекс ЛИРА – САПР 2013: учебное пособие / Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов и др. – Киев – Москва: электронное издание, 2013. – 376 с.
5. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований: нормативно-технический материал. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 45 с.
6. СТО НОСТРОЙ 2.31.12-2011. Строительство, реконструкция, ремонт. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пусконаладочных работ. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 41 с.
7. Строительные нормы и правила: СНиП III – 24–75. Промышленные печи и кирпичные трубы: нормативно-технический материал. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 16 с.
8. Левицкий, И.А. Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла. Расчет стекловаренных печей / И.А. Левицкий, Ю.Г. Павлюкевич. – Минск: БГТУ, 2006. – 110 с.
9. Югов, А.М. Определение температурных полей на контактирующих поверхностях внешнего контура агрегата стекловаренной печи [Текст] / А.М. Югов, В.И. Москаленко, А.В. Ихно, Д.А. Юдкало // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – Вип. 6 (80). – С. 76–83.
10. Розенгард, Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгард, Б.Б. Потапов, В.М. Олышанский и др. – Киев: Вища школа, 1986. – 290 с.
11. Кащеев, И.Д. Химическая технология огнеупоров / И.Д. Кащеев, К.К. Стрелов, П.С. Мамыкин. – Интернет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
12. Дзюзер, В.Я. Огнеупоры для варочной части высокопроизводительной части стекловаренных печей / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 5. – С. 24–32.