

УДК 539.3

**Ю. С. ВОРОБЬЕВ**, д-р техн. наук, проф.; нач. отд. ИПМаш НАНУ, Харьков;  
**М. А. СОЛОХИН**, аспирант; инж. II кат. ОАО «Турбоатом», Харьков;  
**А. Н. ГУБСКИЙ**, начальник сектора ОАО «Турбоатом», Харьков

### **ВЛИЯНИЕ ЖЁСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДЯНОЙ КАМЕРЫ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА ОТКЛИК ОТ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Расчитано напряжённо-деформированное состояние (НДС) в водяной камере конденсатора паровой турбины большой мощности при динамическом воздействии. Проведена оценка работоспособности водяной камеры конкретной конструкции после варьирования жёсткостью её элементов. Получена формула для плоских стенок, укрепленных стяжками, отражающая зависимость между НДС в стяжках и геометрией конструкции. Для проверки универсальности данной зависимости были проведены тестовые расчёты.

**Ключевые слова:** водяная камера, стяжки, напряжения, напряжённо-деформированное состояние, динамическое воздействие.

#### **Введение**

Вследствие развития атомной энергетики, всё чаще используются турбины большой мощности, и всё больше АЭС строится в засушливых регионах, где не представляется возможным использование пруда-охладителя, что приводит к использованию градирен, и, как следствие, к повышению давления в водяных камерах конденсатора и возникновению опасности гидроудара. При нагружении элементов водяной камеры давлением усилие, в основном, воспринимается стяжками камеры, поэтому, одно из самых распространённых разрушений при динамическом воздействии – разрыв стяжек в передней водяной камере. Возникает задача расчёта отклика камеры на динамическое воздействие и снижения повреждений, вызванных динамическим воздействием.

Для анализа взята модель передней водяной камеры конденсатора турбины типа К-235-4,0 с охлаждением конденсатора с помощью градирен.

#### **Численные исследования**

Проблема динамического воздействия на плоские стенки водяных камер, укрепленные стяжками, уже поднималась в работах [1, 2]. На основании данных работ был сделан вывод о том, что некоторые изменения в геометрии могут повлечь за собой значительные изменения напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции. Исходя из полученного вывода, можно предположить, что существует некий закон, отражающий зависимость между НДС конструкции с плоскими укрепленными стенками и её геометрией при динамическом воздействии.

Так как напряжения от динамического воздействия в основном воспринимаются стяжками, то выразим его, как напряжение растяжения для стержня

$$\sigma = \frac{N}{F}, \quad (1)$$

где  $N$  – приложенная нагрузка, а  $F$  – площадь поперечного сечения стяжки. Нагрузка, которая растягивает стяжку, одновременно является нагрузкой, изгибающей плоскую укрепленную стенку. Возьмём участок стенки, ограниченный четырьмя стяжками с

---

© Ю.С. Воробьев, М.А. Солохин, А.Н. Губский, 2014

размерами  $b$  (расстояние между стяжками по  $Oy$ ) и  $c$  (расстояние между стяжками по  $Ox$ ). Выделим из данного участка две полосы единичной ширины по оси  $X$  и оси  $Y$ . Имея значение динамического давления  $P$ , получим значения изгибающих нагрузок на этих участках. Назовём эти нагрузки  $N_x$  и  $N_y$  соответственно осям, вдоль которых расположены участки единичной ширины

$$N_x = 1 \cdot bP; \quad (2)$$

$$N_y = 1 \cdot cP, \quad (3)$$

то, изгибающие моменты для этих участков будут равны:

$$M_x = P b; \quad (4)$$

$$M_y = P c. \quad (5)$$

Значит, изгибающий момент всего участка стенки будет составлять

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = P\sqrt{b^4 + c^4}. \quad (6)$$

Тогда пусть нагрузка  $\mathbf{N} = \frac{\mathbf{M}}{l}$ , где  $l$  – длина стяжки

$$N = \frac{P\sqrt{b^4 + c^4}}{l}. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения стяжки составляет

$$F = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (8)$$

Учитывая выражения (7) и (8), напряжение растяжения для стяжек можно выразить следующим образом

$$\sigma = \frac{N}{F} = \frac{\frac{P\sqrt{b^4 + c^4}}{l}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4P\sqrt{b^4 + c^4}}{\pi d^2 l}. \quad (9)$$

Для получения искомого критерия необходимо дополнительно учесть толщину стенки и допустимое напряжение. Как уже говорилось в статье [2], динамические напряжения растут с понижением податливости стенок. Исходя из этого условия, формула для получения критерия  $K$  будет выглядеть следующим образом

$$K = \frac{4hP\sqrt{b^4 + c^4}}{\pi d^2 l [\sigma]}. \quad (10)$$

где  $h$  – толщина стенки,  $[\sigma]$  – допустимое напряжение для данного материала. Чем ниже значение критерия  $K$ , тем ниже напряжения, возникающие в стяжках от динамического воздействия. Проверим соотношение единиц измерения в формуле:

$$[K] = \frac{\text{м} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{Па}} = 1. \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что  $K$  действительно является безразмерной величиной.

Далее, используя расчёт по методу конечных элементов и меняя геометрические параметры конструкции, подберём величину  $K$ , при которой общие напряжения в конструкции не будут превышать предел текучести  $[\sigma] = 220$  МПа.

Напряженное состояние конструкции показано на рис. 1–6, а значения приведенных напряжений растяжения по сечению стяжки при разных значениях коэффициента  $K$  представлены в таблице 1. Значения напряжений приведены в Па. Величина внутреннего динамически приложенного давления была принята 1,4 МПа.

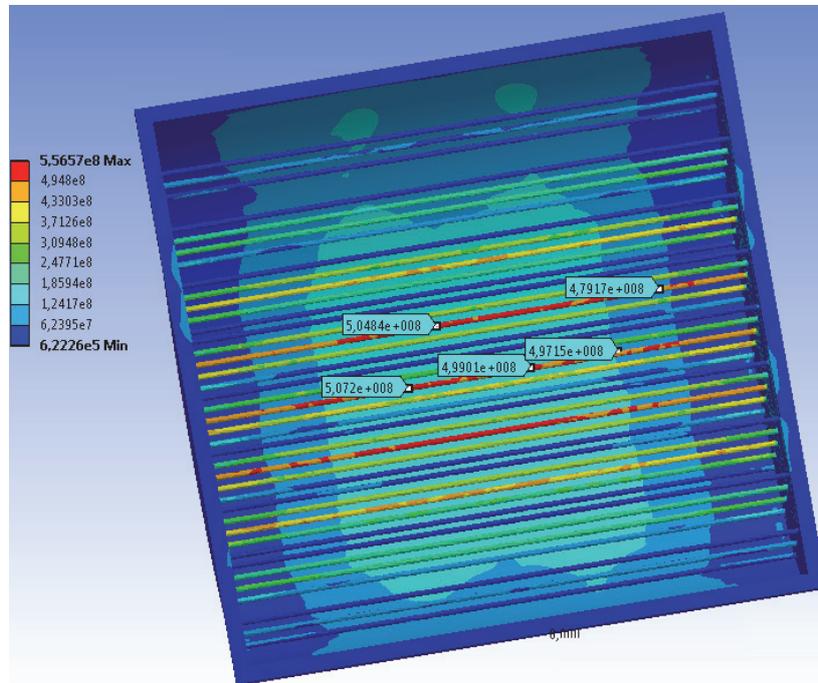


Рис. 1 – Диаметр стяжки 40 мм, толщина стенки 25 мм, расстояние между стяжками 400×400, длина 3905 мм,  $K = 7,3 \cdot 10^{-3}$

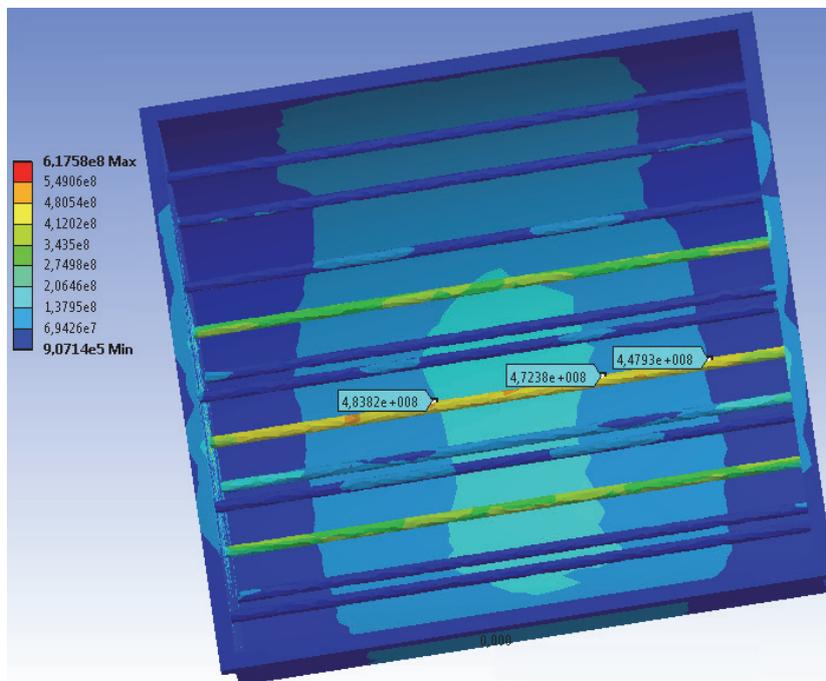


Рис. 2 – Диаметр стяжки 80 мм, толщина стенки 25 мм, расстояние между стяжками 800×800,  $K = 7,3 \cdot 10^{-3}$

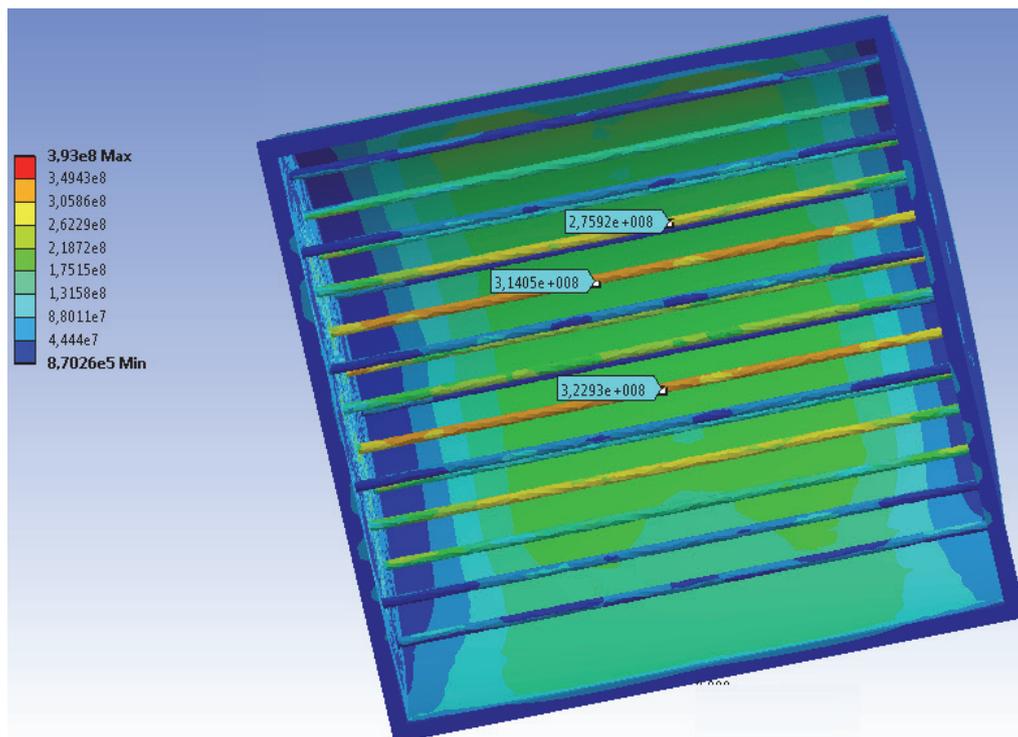


Рис. 3 – Диаметр стязки 70 мм, толщина стенки 22 мм, расстояние между стязками 400×800, длина 3905 мм,  $K = 6 \cdot 10^{-3}$

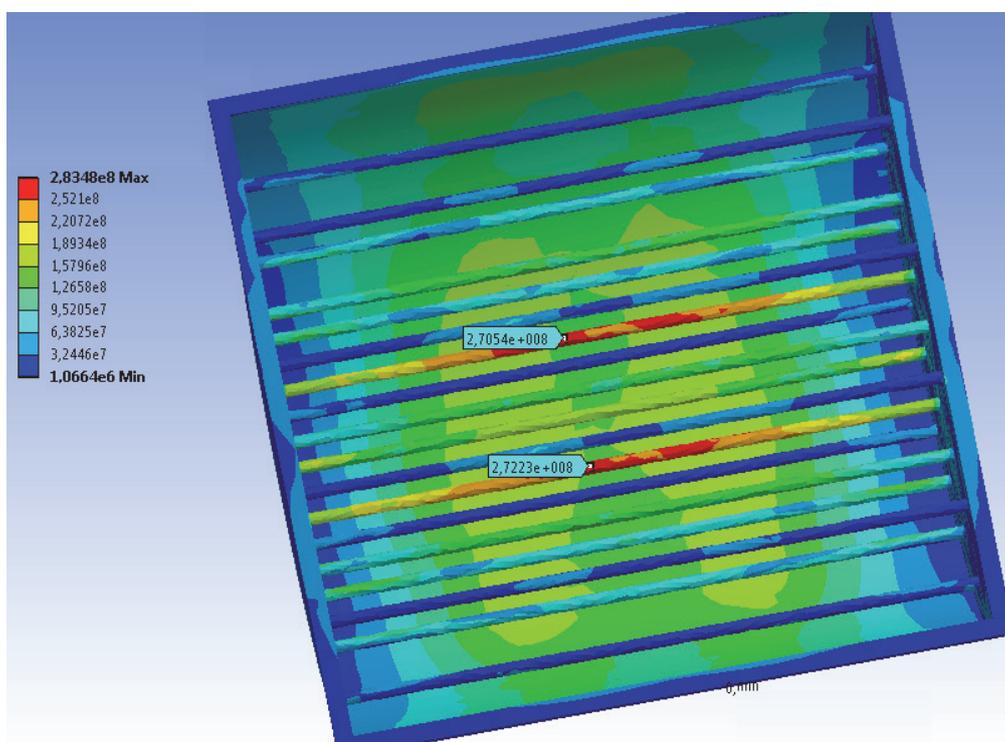


Рис. 4 – Диаметр стязки 80 мм, толщина стенки 25 мм, расстояние между стязками 400×800, длина 3905 мм,  $K = 5,3 \cdot 10^{-3}$

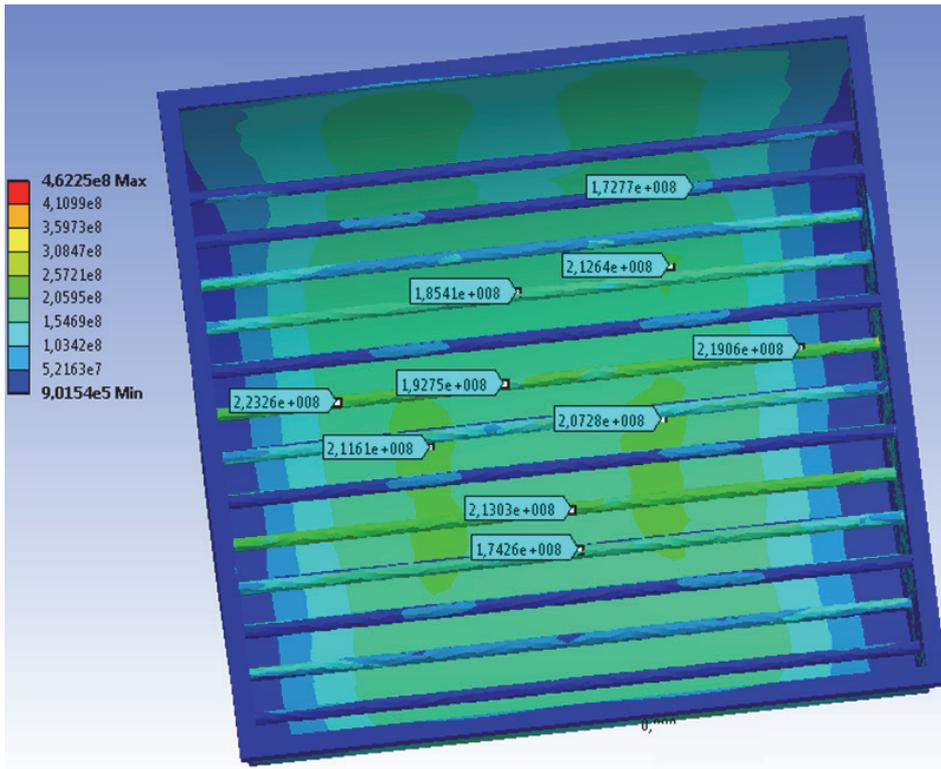


Рис. 5 – Диаметр стяжки 80 мм, толщина стенки 15 мм, расстояние между стяжками 400×800, длина 3905 мм,  $K = 3,2 \cdot 10^{-3}$

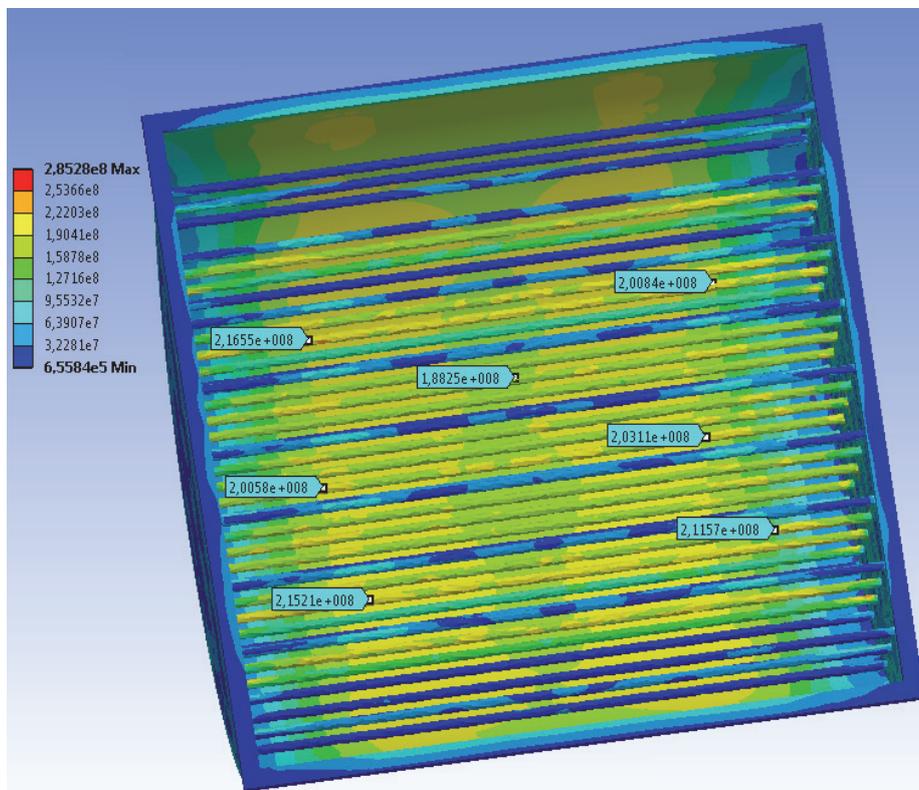


Рис. 6 – Диаметр стяжки 60 мм, толщина стенки 15 мм, расстояние между стяжками 400×400, длина 3905 мм,  $K = 2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 1

Значения приведенных напряжений растяжения по сечению стяжки

K	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{\max}$ , МПа	550	350	270	220	200

В результате расчётов по методу конечных элементов можно сделать вывод, что данная конструкция лучше сопротивляется динамическим воздействиям с комбинацией геометрических характеристик, при которых  $K \leq 2 \cdot 10^{-3}$ . Проверим, является ли это утверждение универсальным для всех конструкций с плоскими стенками. Для данного анализа, чтобы исключить влияние боковых стенок использовались гипотетические конструкции, содержащие только стенки, соединённые стяжками и нагруженные динамически приложенным внутренним давлением.

Напряжённое состояние конструкции показано на рис. 7–11, а значения приведенных напряжений растяжения по сечению стяжки при разных значениях коэффициента K представлены в таблице 2. Величина внутреннего динамически приложенного давления была принята 1,4 МПа

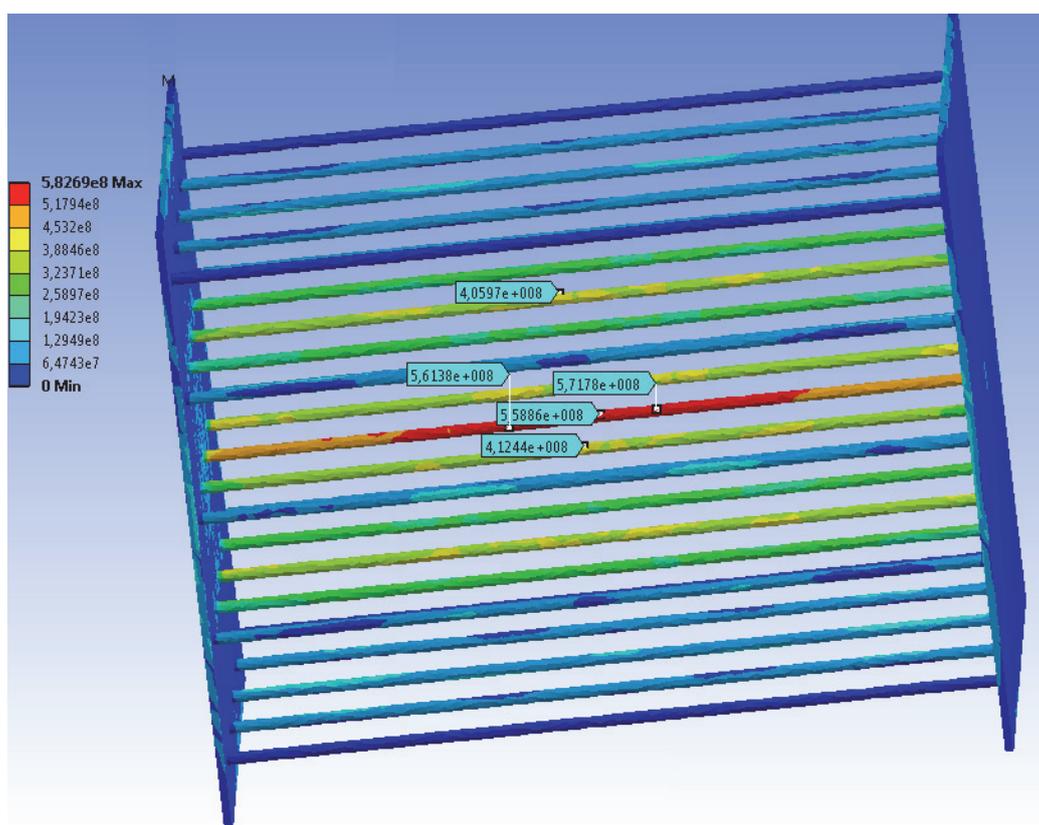


Рис. 7 – Диаметр стяжки 40 мм, толщина стенки 25 мм, расстояние между стяжками 400×400 длина 2500 мм,  $K = 11,5 \cdot 10^{-3}$

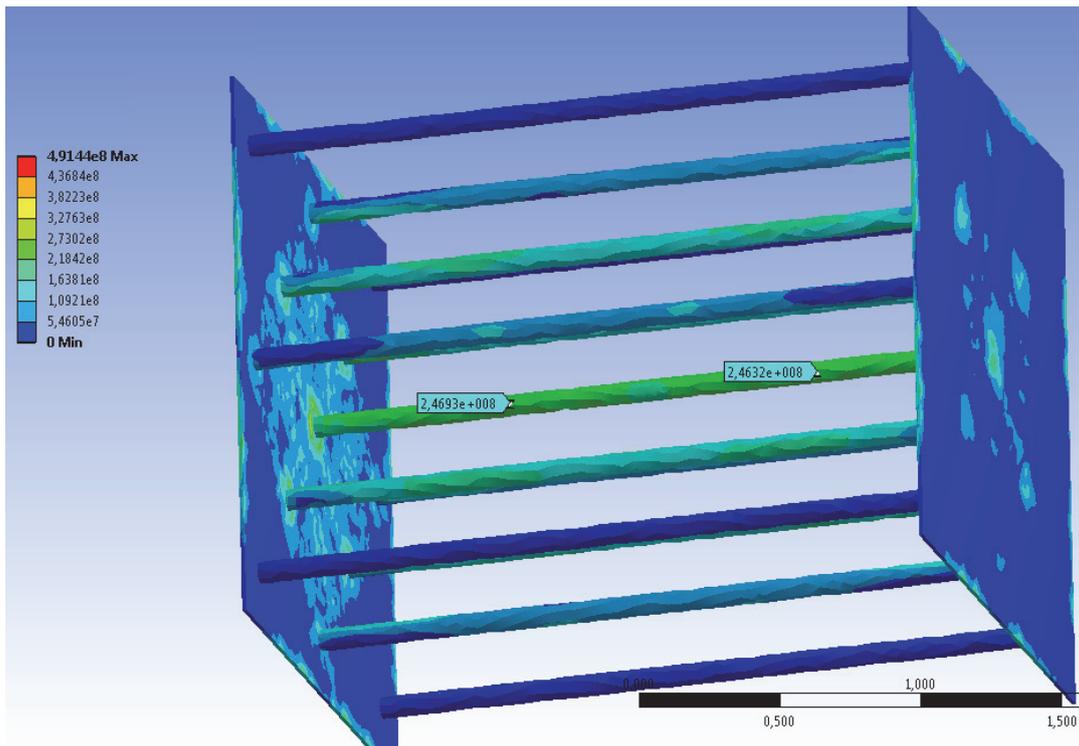


Рис. 8 – Диаметр стяжки 80 мм, толщина стенки 15 мм, расстояние между стяжками 400×800, длина 2500 мм,  $K = 5 \cdot 10^{-3}$

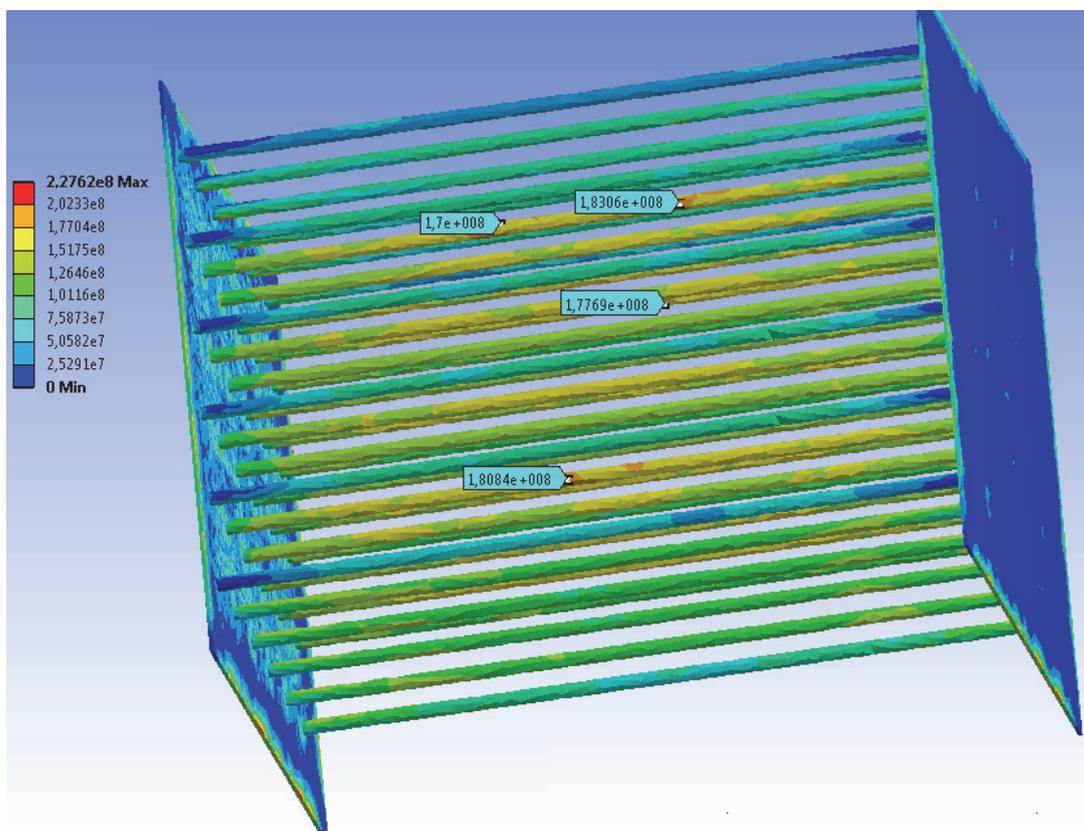


Рис. 9 – Диаметр стяжки 50 мм, толщина стенки 13 мм, расстояние между стяжками 300×300, длина 2500 мм,  $K = 2 \cdot 10^{-3}$

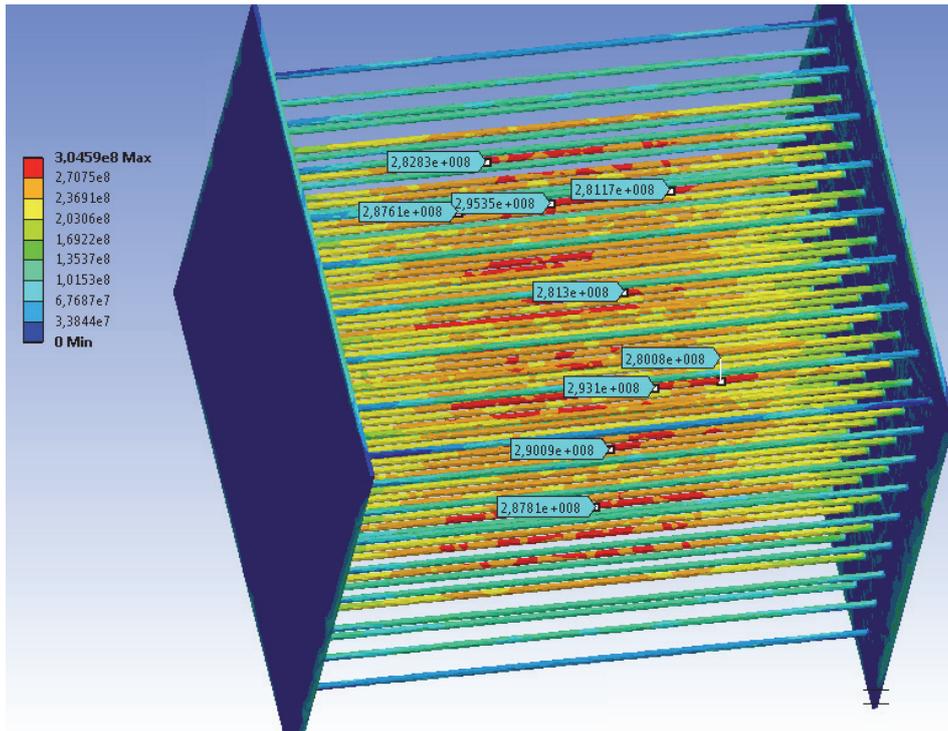


Рис. 10 – Диаметр стяжки 40 мм, толщина стенки 25 мм, расстояние между стяжками 300×300, длина 3000 мм,  $K = 5,4 \cdot 10^{-3}$

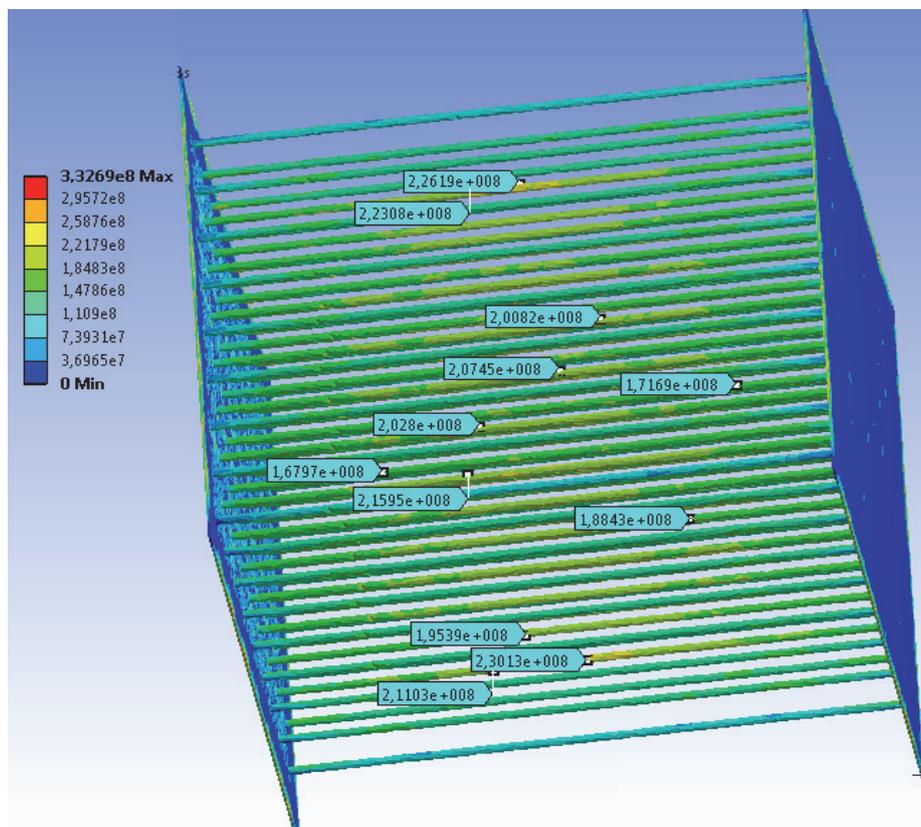


Рис. 11 – Диаметр стяжки 45 мм, толщина стенки 11,36 мм, расстояние между стяжками 300×300, длина 3000 мм,  $K = 2 \cdot 10^{-3}$

Значения приведенных напряжений растяжения по сечению стяжки

$L, \text{ мм}$	2500			3000	
$K$	$11,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{\text{max}}, \text{ МПа}$	580	350	180	300	220

Как показывают результаты данных расчётов, вне зависимости от геометрических характеристик конструкции, содержащей круглые стяжки и плоские стенки наименьшие значения напряжений в стяжка возникают когда коэффициент  $K \leq 2 \cdot 10^{-3}$ .

Для уточнения результатов для выражения (10) целесообразно ввести условие, представленное в ОСТ 108.031.02-75: во всех случаях толщина плоской стенки должна быть не менее определённой по формуле [3]

$$h = 0,125d + 5 \text{ мм} . \tag{12}$$

### **Выводы**

Для конструкции, содержащей плоские стенки, укрепленные стяжками круглого поперечного сечения, как например, водяные камеры конденсаторов паровых турбин, можно вычислить некую величину  $K$ , зависящую от геометрических характеристик конструкции. От значения этой величины будет зависеть отклик конструкции на динамическое воздействие.

**Список литературы:** 1. Солохин, М. А. Влияние формы и размеров корпуса водяной камеры на величину отклика от динамического воздействия / М. А. Солохин, Ю. С. Воробьёв, А. Н. Губский // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования [Электронный ресурс]: материалы XIV междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Электрон. дан. (1 файл). – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 2. Солохин, М.А. Влияние жёсткости элементов водяной камеры конденсатора паровой турбины на отклик от динамического воздействия / М.А. Солохин, Ю.С. Воробьёв, А.Н. Губский // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования [Электронный ресурс]: материалы XIV междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Электрон. дан. (1 файл). – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. 3. ОСТ 108.031.02-75. Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. – Введен. 01.04.77

**Bibliography (transliterated):** 1. Solohin, M. A., Ju. S. Vorob'jov and A. N. Gubskij. "Vlijanie formy i razmerov korpusa vodjanoj kamery na velichinu otklika ot dinamicheskogo vozdejstvija." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija: materialy XIV mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf.* Kharkov: 2012. CD-ROM. 2. Solohin, M. A., Ju. S. Vorob'jov and A. N. Gubskij. "Vlijanie zhjostkosti jelementov vodjanoj kamery kondensatora parovoj turbiny na otklik ot dinamicheskogo vozdejstvija." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija: materialy XIV mezhdunarodnoj nauch.-teh. konf.* Kharkov: 2012. CD-ROM. 3. GOST 108.031.02-75. *Kotly stacionarnye parovye i vodogrejnye i truboprovody para i gorjachej vody. Normy rascheta na prochnost'*. Print.

*Поступила (received) 05.02.2014*