

01

## Анализ концентрации температурных напряжений при прогреве плоской поверхности за счет конденсации водяного пара

© Т.С. Конторович, Ю.А. Радин, А.В. Ольховский

ПАО Мосэнерго,  
119526 Москва, Россия  
e-mail: kontorovich\_ts@mail.ru, vti-unit@yandex.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2023 г.  
В окончательной редакции 11 декабря 2023 г.  
Принято к публикации 22 января 2024 г.

Конденсация водяного пара на начальной стадии происходит в форме отдельных капель, образующихся в центрах конденсации на твердой поверхности, так называемая капельная конденсация, или в виде сплошной пленки жидкости на поверхности — пленочная конденсация. В подавляющем большинстве случаев предметом исследований являются процессы теплообмена, сопровождающие это явление. Работа посвящена анализу термонапряженного состояния прогреваемого за счет конденсации водяного пара твердого тела, на поверхности которого на начальной стадии прогрева произошло образование капель. Этот процесс сопровождался возрастанием температурных напряжений, которые при капельной конденсации достигают локального максимума на границе капли и могут характеризоваться коэффициентом концентрации, используемым авторами по аналогии с коэффициентом концентрации температурных или механических напряжений в механике твердого тела.

**Ключевые слова:** коэффициент концентрации напряжений, капля, термические напряжения, капельная конденсация, пленочная конденсация.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57524.222-23

### Введение

Начальным этапом пусков энергоблоков является предварительный прогрев паропроводов между котлом и паровой турбиной, продолжительность которого может составлять до 20–25% общей продолжительности пуска. Самым коротким по продолжительности режимом прогрева толстостенных паропроводов является их прогрев за счет конденсации пара на их внутренней поверхности, так как коэффициенты теплоотдачи при теплообмене за счет конденсации (более  $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) значительно больше, чем при теплообмене за счет конвекции. Процесс теплообмена при конденсации водяного пара на внутренней поверхности прогреваемых трубопроводов широко описан в литературе [1]. Известны механизмы теплообмена при капельной и пленочной конденсации водяного пара, каждый из которых отличается свойственным только ему уровнем термических напряжений, возникающих в прогреваемой стенке. Задачи расчета термонапряженного состояния при конвективном теплообмене хорошо изучены, однако термонапряженное состояние деталей оборудования при прогреве за счет капельной конденсации в настоящее время изучено мало. Авторами предпринята попытка оценить уровень напряжений, возникающих в плоской стенке при ее прогреве за счет капельной конденсации, когда особенности формы капли вызывают образование в ней неравномерного поля температурных напряжений. Его характеристикой является коэффициент концентрации напряжений, величина которого зависит от формы и раз-

меров капель, их количества, взаимного расположения и времени существования. С увеличением продолжительности существования капли его величина возрастает.

### 1. Коэффициент концентрации напряжений при конденсации как дальнейшее развитие понятий коэффициента концентрации термических и механических напряжений

В механике твердого тела концентрация напряжений возникает при наличии неоднородностей в геометрии или материале конструктивного элемента, которые вызывают прерывание потока напряжений. Это могут быть такие элементы, как отверстия, канавки, выемки, скругления. Концентрация напряжений также может возникать в результате случайных повреждений, например, вмятин и царапин.

Концентрация напряжений при растяжении может быть выражена через безразмерный коэффициент концентрации  $K_t$ , представляющий собой отношение наибольшего напряжения к номинальному, который, например, для круглого отверстия в полубесконечной пластине достигает 3.0 [2].

Для пластичных материалов большие нагрузки могут вызвать локализованную пластическую деформацию, которая обычно возникает первой при концентрации напряжений, в то время как хрупкие материалы при

концентрации напряжений, как правило, разрушаются. Однако повторяющиеся (циклические) нагрузки даже пониженного уровня могут привести к возникновению усталостных трещин, приводящих к разрушению даже пластичных материалов. При прогреве твердого тела за счет конденсации водяного пара по механизму капельной конденсации возникающие напряжения также можно характеризовать коэффициентом, аналогичным конструктивному коэффициенту концентрации напряжений, который достигает наибольшего значения на границе капли, что объясняется скачкообразным уменьшением напряжений при переходе на ненагруженную поверхность твердого тела. Чем это вызвано? Капля своим весом вызывает упругую деформацию горизонтальной поверхности, на которой она образовалась, вытесняя материал поверхности по периметру капли, стремящейся сохранить свой объем, равный исходному. Изменение положения поверхности в пространстве, на которой образовалась капля, снижает величину этого коэффициента.

## 2. Физическая постановка задачи исследования. Описание расчетной модели

В прикладных задачах прогрева толстостенных паропроводов энергетических блоков главным является определение его продолжительности, зависящей от возникающих в них термических напряжений и допустимого количества циклов прогрева-остывания. В проводившихся ранее экспериментальных исследованиях пусковых режимов паросиловых энергоблоков сверхкритического давления мощностью 300 MW ТЭС с промежуточным перегревом пара было постулировано, что предварительный прогрев паропроводов высокого давления и горячих ниток паропроводов промежуточного перегрева пара следует выполнять за счет организации расхода пара через эти паропроводы при конвективном механизме теплообмена [3,4].

Если паропроводы высокого давления прогреваются относительно быстро по всей длине за счет открытия паровых байпасов большого сечения, то организовать конвективный прогрев горячих ниток паропроводов после промежуточного перегрева пара в условиях одnobайпасных тепловых схем оказалось весьма сложной задачей из-за отсутствия возможности организации больших расходов пара, их большой металлоемкости и невозможности прогрева конвекцией концевых участков перед цилиндром среднего давления паровой турбины, длина которых в некоторых случаях превышала 10 м. Не менее сложная ситуация складывается и при прогреве пароперепускных труб высокого давления между стопорными и регулирующими клапанами паровых турбин К-300-240, длина которых также превышает 10 м, а дренаж находится в средней их части; так что вертикальный участок трубы  $168 \times 32$  мм от дренажа до

корпуса регулирующего клапана турбины длиной более 8 м прогревается в безрасходном режиме.

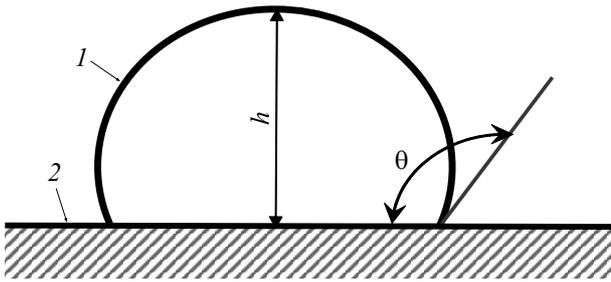
Расчеты термонапряженного состояния этих паропроводов при их предварительном (до подачи пара в турбину) конвективном прогреве показывали, что допустимые по условиям малоциклового термической усталости скорости их прогрева составляют  $0.5-1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ . Аналогичные расчеты, выполненные для паропроводов высокого и среднего давления парогазовых установок и выходных коллекторов пароперегревателей котлов-утилизаторов, позволили обосновать близкие по величине скорости их прогрева.

В [1,5,6] прямо указывалось на предпочтительность прогрева за счет конденсации пара, хотя для его применения существует ряд ограничений, возникающих в том числе из-за неудачного расположения и недостаточной пропускной способности дренажных систем, не обеспечивающих эффективное удаление конденсата при прогреве паропроводов за счет конденсации пара. Действительно, дренажные трубопроводы, как правило, имели значительное гидравлическое сопротивление из-за малого их диаметра  $d_y = 20-30$  мм и большой длины, превышавшей 10 м при наличии местных сопротивлений, таких как гибы и запорная арматура. При таком способе прогрева имеется риск выноса остатков не удаленного конденсата в проточную часть турбины.

Исходя из сказанного и с учетом того, что технология прогрева за счет конденсации пара значительно проще и эффективнее, в настоящей работе выполнен анализ особенностей физического механизма такого прогрева и обоснования его применимости на практике с точки зрения термической прочности прогреваемых деталей энергооборудования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть различные механизмы конденсации.

При том, что исследованиям процессов теплопередачи при капельной и пленочной конденсации уделяется значительное внимание, работы, посвященные анализу термических напряжений, возникающих в прогреваемой детали при конденсации пара на ее поверхности, а также анализу концентрации напряжений при прогреве за счет конденсации крайне редки. В [7] рассмотрена задача передачи тепла через пленку конденсата при прогреве паропроводов на начальных этапах пуска, происходящем при этом „захолаживании“ металла труб и, как следствие, возникающих знакопеременных термических напряжениях. Следует заметить, что прогрев остывших паропроводов при пусках из холодного и неостывшего состояния (температура металла паропроводов не превышает  $100^\circ\text{C}$ ) начинается именно с появления капель конденсата на внутренних поверхностях элементов парового тракта, таких как коллекторы, паропроводы, внутренние поверхности корпусов стопорных клапанов, в проточной части турбин, контактирующих с паром, продолжительность существования которых мала.

Наиболее распространенный механизм образования капель состоит в том, что они возникают в определенных местах зародышеобразования (ямках, бороздках,



**Рис. 1.** Схематичное изображение капли конденсата пара (1) с углом смачивания  $\theta$  к пластине (2) ( $h$  — максимальная высота капли).

шероховатостях), при этом область между каплями неактивна по отношению к конденсации [7,8]. Капли растут сначала за счет процесса конденсации пара на их поверхности, а затем и за счет слияния, в то время как участок поверхности между растущими каплями остается практически сухим. Именно этот механизм был принят за основу при расчетном анализе его влияния на термонапряженное состояние теплообменной поверхности. В пользу такого подхода говорит и отсутствие напряжений в прогреваемой поверхности на начальных стадиях ее прогрева [7].

Капельная конденсация отличается высокой интенсивностью теплообмена (в 15–20 раз выше, чем при пленочной конденсации) [9]. Процесс капельной конденсации относится к начальному этапу прогрева, поэтому рассматривается конденсация неподвижного пара. В пространстве между каплями тепло от пара передается теплопроводностью [9]. В процессе прогрева конденсацией мелкие капли конденсата увеличиваются в размерах, сливаются, образуя пленку, и снижая тем самым температурные напряжения в прогреваемой стенке [8].

В качестве первого приближения рассматриваются одиночные капли различных размеров, образовавшиеся на поверхности плоской бесконечной пластины толщиной 34 мм, изготовленной из стали 12Х1МФ (характерной для стенок выходных коллекторов пароперегревателей высокого давления). Модель капли представляет собой шаровой сегмент, высота которого меньше диаметра капли. Краевой угол смачивания  $\theta$  (рис. 1), т.е. угол, образованный касательной к поверхности раздела фаз конденсат–пар и твердой поверхностью, с вершиной в точке контакта капли с поверхностью и всегда измеряемый внутрь жидкой фазы  $> 90^\circ$ , что является признаком не смачиваемости [9].

Расчет проводился методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS, обладающего широкими возможностями в области решения задач теплообмена и механики деформированного твердого тела.

С целью анализа термонапряженного состояния пластины при капельной конденсации рассматривались различные расчетные модели с расположенными на ее по-

верхности одиночными каплями диаметром 1,25 и 5 мм (рис. 2, а), группами из  $9 \times 5$  капель тех же размеров, отстоящих друг от друга на расстоянии их диаметров (рис. 2, б), группой капель диаметром 5 мм, касающихся друг друга (рис. 2, в), что соответствует их состоянию перед слиянием и образованием пленки жидкости. Принятое количество капель в группе связано с упрощением расчетов и определялось возможностями используемого компьютера.

На боковых гранях пластины и плоскости симметрии заданы условия отсутствия перемещений в направлении, перпендикулярном этим плоскостям. Свободные от капель поверхности пластины и плоскости, полученные в результате сечения конструкции плоскостью симметрии, теплоизолированы. К поверхностям теплообмена капель приложены краевые условия третьего рода (коэффициент теплоотдачи от пара к поверхности капель принят равным  $10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [9], температура равна температуре насыщения при текущем давлении пара). Поверхность пластины между каплями прогревается за счет теплопроводности [1].

В расчетах учитывалось, что теплопередача происходит только через капли и ограничивается их термическим сопротивлением, которое возрастает с увеличением размера капель.

Температура пара у поверхности капли и у теплообменной поверхности равна температуре насыщения, под каплями вблизи от поверхности пластины температура несколько ниже (не более чем на  $0.5^\circ\text{C}$ ).

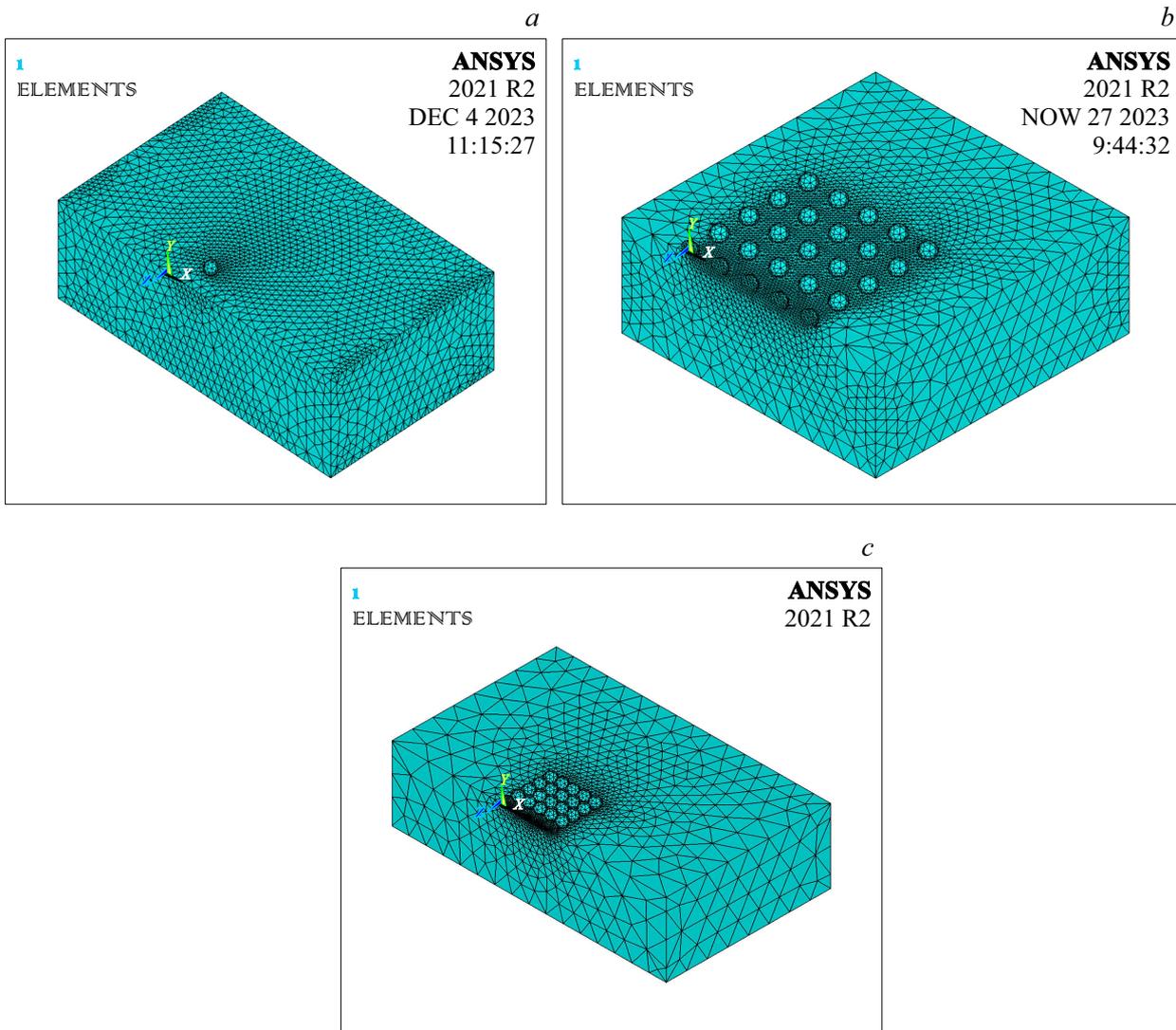
Кроме того, рассмотрен вариант, когда весь объем воды, сосредоточенный в каплях диаметром 5 мм, равномерно распределен по поверхности пластины, образуя пленку толщиной 0.1–0.15 мм (толщина определена для пластины конкретного размера, использованной в модельных расчетах).

В настоящей работе не учитывался прогрев пластины при нарастании размера капли [1,8] от минимального до заданного, а начальная температура пластины во всех расчетах принималась равной  $50^\circ\text{C}$ , что гарантированно обеспечивает прогрев ее за счет конденсации.

### 3. Анализ результатов расчета

Полученное в результате расчета распределение температур в поперечном сечении пластины приведено на рис. 3: для отдельных капель диаметром 5 мм системы капель, отстоящих друг от друга на расстоянии диаметра капли и касающихся друг друга перед их слиянием с образованием пленки.

Такой же характер, как и температура, имеет распределение напряжений. Максимальные значения интенсивности напряжений, полученные согласно приведенным выше значениям температур (рис. 3), через 10 с после начала прогрева составили для одиночной капли  $80.7 \text{ МПа}$ , для капель, расположенных на расстоянии



**Рис. 2.** Конечноэлементные модели капельной конденсации на поверхности плоской пластины с каплями диаметром 5 мм: *a* — одиночная капля; *b* — группа из  $9 \times 5$  капель диаметром 5 мм, отстоящих друг от друга на 5 мм; *c* — группа из  $9 \times 5$  капель, касающихся друг друга перед слиянием.

5 мм друг от друга, 80.9 МПа; минимальные — для одиночной капли — 80.1 МПа, для капель, расположенных на расстоянии 5 мм друг от друга 79.2 МПа; для капель, касающихся друг друга максимальные значения интенсивности напряжений наблюдаются через 3.0 с после начала прогрева и составляют 103 МПа, минимальные — 98.6 МПа.

Напряжения в пластине под пленкой конденсата, толщина которой определялась, исходя из его объема, образующего капли, практически равны нулю.

На основании полученных результатов определены коэффициенты концентрации напряжений как для одиночных капель различного диаметра, так и для группы капель. Коэффициент концентрации определялся как отношение максимальных значений напряжений в пластине в местах расположения капель к номинальным значениям напряжений, в качестве которых рассматри-

вались напряжения, возникающие в свободной от капель части пластины на расстоянии от них, определяемом в соответствии с принципом Сен-Венана.

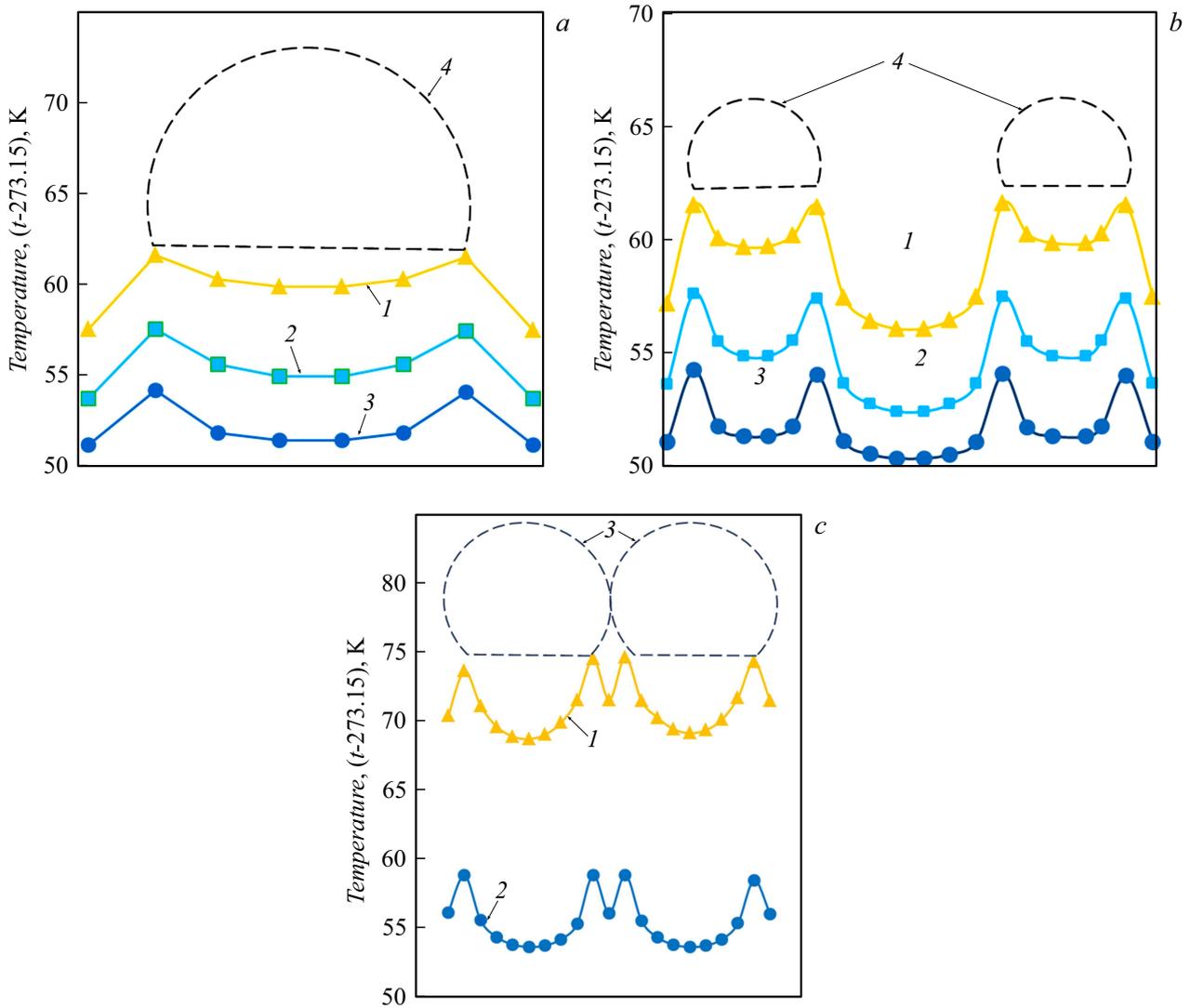
Рассматривалось изменение коэффициента концентрации от начала прогрева до образования пленки.

Время перехода от одного размера капли к другому (табл. 1) рассчитывалось, исходя из скорости роста размера капель.

Скорость роста капель определялась по формуле для полусферической капли [8,9]:

$$\frac{dR}{d\tau} = 2 \frac{\lambda_{liq} \vartheta_{drop}}{r \rho_{liq} R},$$

где  $R$  — радиус кривизны поверхности капли, имеющей форму сферического сегмента, [м],  $\tau$  — время, [с],  $\lambda_{liq}$  — коэффициент теплопроводности жидкости, [W/(m·K)],  $\vartheta(\xi, \varphi)$ ,  $\vartheta_{drop}$  — температура капли как



**Рис. 3.** Распределение температур в пластине под каплями диаметром 5 мм: *a* — одиночная капля; *b* — группа из  $9 \times 5$  капель диаметром 5 мм, отстоящих друг от друга на 5 мм; *c* — группа из  $9 \times 5$  капель, касающихся друг друга перед слиянием. 1 — температура через 10 s после начала прогрева, 2 — температура через 3 s после начала прогрева (для касающихся друг друга капель 1), 3 — температура через 0.5 s после начала прогрева (для касающихся друг друга капель 2), 4 — капли (для касающихся друг друга капель 3).

**Таблица 1.** Расчет времени существования капель

Расчет по формуле (1)			Примечание
$R$ (Радиус капли), м	$dR/d\tau$ , м/с	$\tau$ , s	
$0.5 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	4.16	Рост капли от радиуса 0.5 мм до радиуса 1.25 мм
$1.25 \cdot 10^{-3}$	$7.21 \cdot 10^{-5}$	10.4	Рост капли от радиуса 1.25 мм до радиуса 2.5 мм
$2.5 \cdot 10^{-3}$	$3.61 \cdot 10^{-5}$	2.77	Рост капли от радиуса 2.5 мм до радиуса 2.6 мм

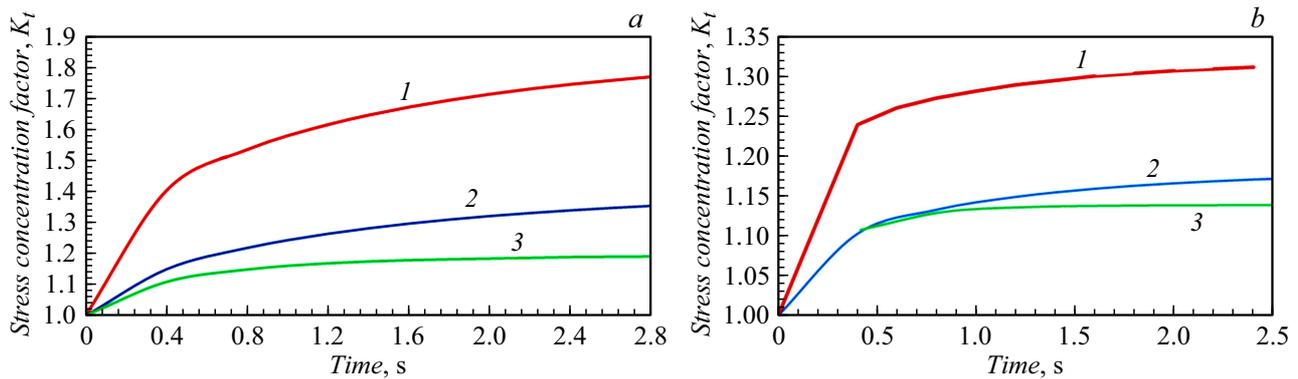
функция полярного радиуса  $\xi$  и полярного угла  $\varphi$ , температурный напор  $\vartheta_{drop} = T_{surf} - T_{wall}$ , [°C],  $T_{surf}$  —

температура внешней поверхности капли конденсата, равная температуре насыщения при заданном давлении пара, [°C],  $T_{surf} = 250^\circ\text{C}$ ,  $T_{wall}$  — температура стенки, [°C],  $T_{wall} = 50^\circ\text{C}$ ,  $r$  — удельная теплота фазового перехода, [J/kg],  $\rho_{liq}$  — плотность жидкости, [kg/m<sup>3</sup>].

Результаты расчета коэффициента концентрации для отдельной капли и капель, образующих группу, приведены в табл. 2 и на рис. 4.

На рисунке представлена зависимость от времени величины коэффициента концентрации напряжений в месте контакта капель конденсата и пластины при прогреве капельной конденсацией.

Нагрузка на пластину от системы капель вызывает ее упругую деформацию, образуя интерференционную картину распределения напряжений на поверхности. По-



**Рис. 4.** Изменение во времени коэффициента концентрации напряжений при капельной конденсации с каплями различного диаметра: *a* — для группы капель, *b* — для отдельных капель. 1 — капли диаметром 5 мм, касающиеся друг друга перед их слиянием, 2 — капли диаметром 2.5 мм, 3 — капли диаметром 1 мм.

**Таблица 2.** Значения коэффициента концентрации напряжений при прогреве конденсацией для единичной капли и группы капель

Диаметр капли, мм	Коэффициент концентрации напряжений при прогреве конденсацией	
	Единичной капли	Группы капель
1	1.14	1.2
2.5	1.18	1.4
5	1.31	1.84

этому в системе капель (рис. 4, *a*) общий уровень напряжений возрастает по отношению к отдельной капле (рис. 4, *b*).

Таким образом, термические напряжения на границе капель при прогреве подложки принимают вид

$$\sigma_t = K_t \sigma,$$

где  $K_t$  — коэффициент концентрации напряжений на границе контакта капель с подложкой. Коэффициент концентрации напряжений должен учитывать коэффициент поверхностного натяжения, характеризующий работу молекулярных сил при изменении площади свободной поверхности.

Для рассматриваемого случая прогрева за счет капельной конденсации соотношение для коэффициента концентрации  $K_t$  может быть представлено в виде

$$K_t = 1 + 2q\sqrt{\sin(\pi - \theta)},$$

где  $\theta$  — угол смачивания (рис. 1),  $q$  — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений изменяется в интервале 0.6–0.9 [10].

Как показали проведенные расчеты термонапряженного состояния стенки коллектора высокого давления  $426 \times 34$  мм с расположенной на ней пленкой конденсата, даже при ее прогреве при скачкообразном повышении давления пара максимальные напряжения на внутренней поверхности стенки не превышают 85 МПа, а при

скорости повышения давления 1 МПа/мин — 45 МПа [7]. Максимальное значение напряжений, возникающих в пластине толщиной 34 мм с расположенными на ней и касающимися друг друга каплями диаметром 5 мм, перед их слиянием составляет 103 МПа. В случае, если капли удалены друг от друга на расстояние примерно равное их диаметру, напряжение в пластине не превышает 80 МПа.

Таким образом, можно говорить о том, что напряжения, возникающие в металле при капельной и пленочной конденсации, соизмеримы по величине, более того при определенных условиях напряжения при капельной конденсации могут превосходить напряжения, возникающие при пленочной конденсации.

Однако при анализе термонапряженного состояния стенки при ее прогреве конденсацией, определяющей является пленочная конденсация. Такой вывод следует из малой продолжительности существования капель до их слияния и образования пленки. При этом напряжения не достигают максимальных значений, чему способствует наклонное или вертикальное положение поверхности теплообмена (например, паропровод или коллектор).

Как было сказано выше, применение технологии прогрева за счет конденсации пара требует организации эффективных систем дренирования, с помощью которых возможно полное удаление образующегося при прогреве конденсата. Однако тепловые схемы на действующем в настоящее время оборудовании ТЭС зачастую недостаточно эффективны, паропроводы имеют значительные по длине тупиковые участки, удаление конденсата из которых затруднено. В этих случаях можно использовать техническое решение, согласно которому следует кратковременно снизить давление пара в паропроводах на 5–10% от текущего его значения, что позволит выпарить весь оставшийся конденсат и удалить образовавшийся пар [11]. Например, при прогреве паром с давлением 3–3.5 МПа снижение давления на 0.3 МПа на завершающей стадии прогрева приведет к вскипанию

и испарению конденсата при снижении температуры насыщения на 5–6°C [12].

## Заключение

В работе рассмотрено напряженное состояние пластины, прогреваемой за счет конденсации пара на ее поверхности. Показано, что термические напряжения в прогреваемой пластине в зависимости от механизма конденсации распределены неравномерно по ее поверхности, под каплями, в промежутках между ними и под пленкой. В результате проведенных расчетов получены численные значения коэффициентов концентрации напряжений, возникающих при прогреве, которые представляют собой отношение максимальных напряжений в пластине под каплями или пленкой к номинальным напряжениям, которые возникают на свободной от капель поверхности. Возникающие при прогреве за счет капельной конденсации напряжения в пластине зависят от размера капли, времени ее существования, количества образовавшихся капель. Чем длительнее время существования отдельных капель, чем больше их количество и размер, тем выше уровень напряжений, возникающих в месте их расположения. Для капель при их касании перед слиянием асимптотическое значение коэффициента концентрации достигает  $\geq 1.8$ .

При пленочной конденсации величина возникающих в прогреваемой пластине напряжений зависит от скорости изменения температуры насыщения. Во всех случаях продолжительность прогрева паропроводов за счет конденсации значительно (более чем в 3 раза) меньше, чем при конвективном прогреве. Напряжения, возникающие в металле при капельной и пленочной конденсации, соизмеримы и относительно невелики (порядка 100 МПа). Однако в силу непродолжительности существования капель до их слияния и образования пленки при анализе термонапряженного состояния стенки определяющей является пленочная конденсация.

Надежность прогрева паропроводов может быть существенно повышена за счет снижения давления пара в паропроводах на малую величину (порядка 5–10%) на завершающей стадии такого прогрева, тем самым полностью выпарив остатки конденсата, образованного при прогреве и не удаленного через систему дренажей.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству ПАО „Мосэнерго“ и лично заместителю управляющего директора — главному инженеру С.Н. Ленёву за помощь при выполнении исследования.

## Финансирование работы

Работа выполнена за счет собственных средств авторов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.П. Исаченко. *Теплообмен при конденсации* (Энергия, М., 1977)
- [2] С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. *Теория упругости* (Наука, М., 1979)
- [3] Ю.А. Радин. Надежность и безопасность энергетики, **15** (1), 4 (2022).
- [4] Е.Р. Плоткин, А.Ш. Лейзерович. *Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков* (Энергия, М., 1980)
- [5] СО153-34.25.512 (СПО ОРГРЭС, М., 1975)
- [6] РД 153-34.1-25.507-97 (СПО ОРГРЭС, М., 1999)
- [7] Ю.А. Радин, Т.С. Конторович. *Теплоэнергетика*, **1**, 69 (2021). DOI: 10.1134/S0040363621010161 [Yu.A. Radin, T.S. Kontorovich. *Thermal Engineering*, **68** (1), 59 (2021). <https://doi.org/10.1134/S004060152101016X>]
- [8] Basant Singh Sikarwar, Sameer Khandekar, K. Muralidhar. *Sādhanā*, **38** (6), 1135 (2013). <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/sadh/038/06/1135-1171>
- [9] М.А. Михеев, И.М. Михеева. *Основы теплопередачи* (Энергия, М., 1977)
- [10] И.Э. Келлер, Д.С. Петухов. *Критерии прочности и пластичности*: уч. пособие (ПНИПУ, Пермь, 2020)
- [11] В.И. Гомболевский, Ю.А. Радин, Ю.В. Нестеров, В.В. Крашенинников. *Труды ЦКТИ*, **285**, 213 (2002).
- [12] А.А. Александров, Б.А. Григорьев. *Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара* (Изд-во МЭИ, М., 1999)