

---

---

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

---

---

**ИЗУЧЕНИЕ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ  
НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРУБ  
МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ**

© 2021 г. С. З. Сапожников<sup>а</sup>, В. Ю. Митяков<sup>а</sup>, А. В. Митяков<sup>а</sup>,  
А. Ю. Бабич<sup>а</sup>, Э. Р. Зайнуллина<sup>а</sup>. \*

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия

\*e-mail: zaynullinaelza@gmail.com

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

После доработки 26.01.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Градиентная теплотметрия — современная технология, предусматривающая измерение плотности теплового потока с помощью градиентных датчиков. С 2015 г. градиентная теплотметрия используется для изучения теплообмена при пленочной конденсации насыщенного водяного пара на наружной и внутренней поверхностях труб. Этот способ измерения информативнее, чем более распространенная термометрия, когда плотность теплового потока рассчитывается по измеренной с помощью термометра температуре. Преимущество градиентной теплотметрии связано с аномально высоким быстродействием датчиков, постоянная времени которых составляет  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с, поэтому их можно считать практически безынерционными. Прямое измерение плотности теплового потока снижает суммарную стандартную неопределенность при расчете местных и средних коэффициентов теплоотдачи. В данной работе с помощью градиентной теплотметрии проведено исследование теплообмена при пленочной конденсации насыщенного водяного пара на наружной и внутренней поверхностях трубы. На наружной поверхности использовались градиентные датчики теплового потока из монокристаллического висмута, а на внутренней — гетерогенные градиентные датчики теплового потока из композиции сталь 12X18H9T + Ni. Тестовые опыты в обоих случаях выполнялись на вертикальных трубах. Полученные результаты подтвердили высокую информативность нового подхода и его применимость для оценки плотности теплового потока. Проведена серия опытов по изучению теплообмена при пленочной конденсации насыщенного водяного пара на наружной и внутренней поверхностях наклонных труб. Наибольший коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы наблюдается при отклонении трубы от вертикали на угол  $20^\circ$  и составляет  $6.94 \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , что на 14.9% превышает значение на вертикальной трубе. Теплообмен при конденсации на внутренней поверхности трубы наиболее интенсивен при отклонении ее от вертикали на  $60^\circ$ .

*Ключевые слова:* градиентная теплотметрия, градиентные датчики теплового потока, гетерогенные градиентные датчики теплового потока, пленочная конденсация, насыщенный пар, плотность теплового потока, коэффициент теплоотдачи, временные и угловые теплотграммы

**DOI:** 10.1134/S0040363621090071

В конструкторском расчете конденсаторов площадь теплообменной поверхности, плотность теплового потока и коэффициенты теплоотдачи (КТО) обычно определяют путем итерационных вычислений. В подавляющем большинстве экспериментальных работ местную плотность теплового потока при конденсации рассчитывают по показаниям термометра [1–5], а эффект от применения поверхностных интенсификаторов — по результатам интегральных измерений [6, 7]. Распределение конденсатной пленки по поверхности труб и влияние поверхностных интенсификаторов на течение ис-

следуют, в основном, с применением оптических методов [8], малоперспективных в промышленном эксперименте.

С 2015 г. в лаборатории Научно-образовательного центра “Теплофизика в энергетике” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого теплообмен при конденсации изучают с помощью градиентной теплотметрии [9], высокая информативность которой подтверждена ранее при исследовании конвективного теплообмена в однофазных средах [10]. Предлагаемый подход позволяет измерять местные плотности

теплового потока, рассчитывать местные КТО и оценивать распределение конденсатной пленки по поверхности теплообмена без визуализации ее течения.

Эксперименты охватывают теплообмен при конденсации на наружных и внутренних поверхностях труб.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Градиентная теплотометрия — инновационная технология, основанная на применении градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), изготовленных из анизотропных материалов. Если такой материал представляет собой слоистый композит, то датчики являются гетерогенными градиентными датчиками теплового потока (ГГДТП). Принцип действия ГДТП и ГГДТП основан на поперечном эффекте Зеебека [9]. Регистрируемая термоЭДС пропорциональна плотности теплового потока, проходящего через датчик:

$$E = S_0 q F,$$

где  $S_0$  — вольт-ваттная чувствительность ГДТП или ГГДТП, мВ/Вт;  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  — площадь поверхности ГДТП или ГГДТП, м<sup>2</sup>.

Постоянная времени ГДТП и ГГДТП составляет  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с, что позволяет считать их практически безынерционными средствами измерения.

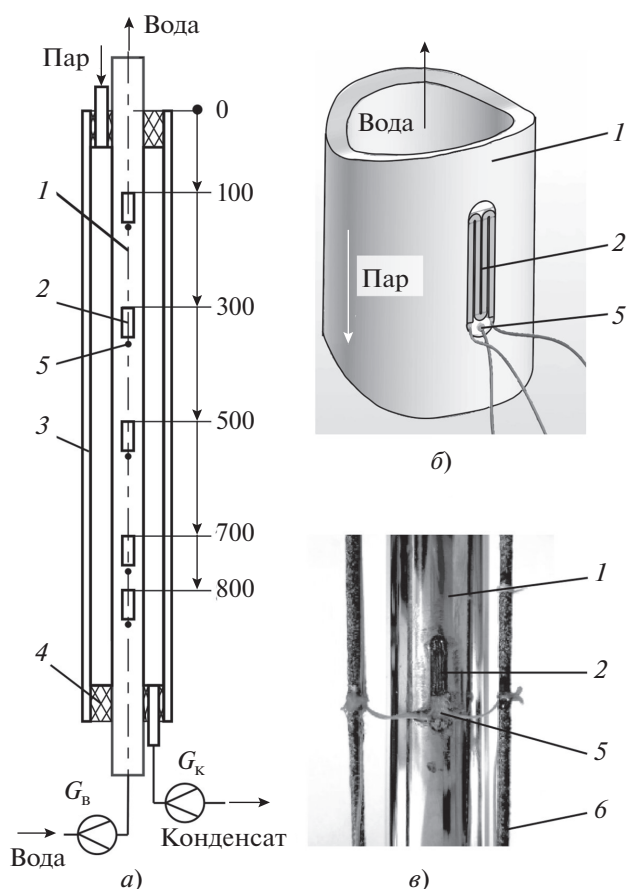
В качестве природного анизотропного материала ГДТП используют преимущественно монокристаллический висмут чистой 0.9999. Вольт-ваттная чувствительность таких датчиков не зависит от температуры [9].

Изготовление ГГДТП начинают с формирования многослойного бруска из материалов, заметно различающихся по теплофизическим и электрофизическим свойствам, которые соединяют в монолит методом диффузионной сварки. Бруски разделяют на косые слои толщиной 0.1–0.2 мм на установке электроискровой резки. Гетерогенные градиентные датчики более термостойки, чем ГДТП на основе висмута, и более надежны в условиях экспериментов, однако их вольт-ваттная чувствительность зависит от температуры.

Тип датчика подбирается в зависимости от цели исследования, требуемых размеров и вольт-ваттной чувствительности.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

Результаты предыдущих исследований авторов данной работы [11, 12] подтвердили возмож-



**Рис. 1.** Экспериментальная модель для изучения теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы.

*a* — схема измерительного участка; *б* — монтаж ГДТП и термопары; *в* — отвод проводов к струнам-направляющим.

*1* — труба из нержавеющей стали; *2* — ГДТП; *3* — кожух; *4* — резиновая пробка; *5* — горячий спай полукристаллической термопары; *6* — струны-направляющие

ность использовать ГГДТП из композиции сталь 12Х18Н9Т + Ni для изучения теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы. Новым этапом в этом направлении исследований стало применение ГДТП из монокристаллического висмута.

Экспериментальный участок, собранный по схеме “труба в трубе” показан на рис. 1, *a*. Внутренняя труба из нержавеющей стали наружным диаметром  $d_1 = 20$  мм зафиксирована резиновыми пробками в кожухе из армированной резины внутренним диаметром  $d_2 = 60$  мм. При проведении экспериментов в межтрубное пространство сверху подавался насыщенный водяной пар при атмосферном давлении, его расход составил 2.8 г/с. В трубу из нержавеющей стали поступала охлаждающая вода с температурой  $t_{H_2O} = 20^\circ\text{C}$  и расходом 200 мл/с. Конденсат отводился в конденсато-

сборник, где по массе конденсата определяли его расход.

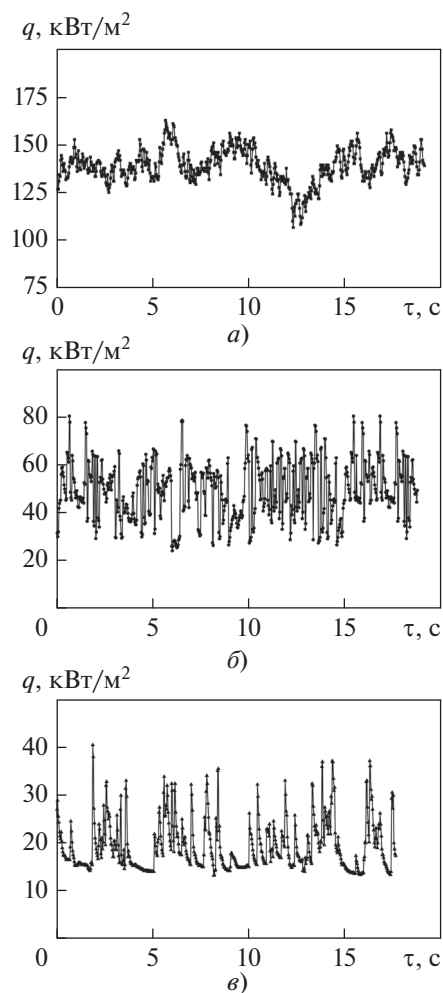
Пять ГДТП из монокристаллического висмута были смонтированы на одной образующей трубы на разных расстояниях  $x$  от верхнего среза измерительного участка:

ГДТП	$x$ , мм
№ 1 .....	100
№ 2 .....	300
№ 3 .....	500
№ 4 .....	700
№ 5 .....	800

Датчики размерами  $10.5 \times 2.5 \times 0.3$  мм были установлены в выфрезерованные выемки заподлицо с наружной поверхностью трубы (рис. 1, б). Для уменьшения количества проводов измерение температуры выполнялось с помощью полусинтетических термопар, спаи которых представляют собой контакты между материалом экспериментальной модели (сталь 12Х18Н9Т) и термоэлектродами из меди. Для расчета местных КТО в местах установки датчиков приварены пять горячих спаев полусинтетических термопар из композиции сталь 12Х18Н9Т + Cu с общим холодным спаем, расположенным в месте подвода охлаждающей воды. Для уменьшения искажений в естественном течении конденсата провода от датчиков и термопар отведены по струнам-направляющим (рис. 1, в), удаленным от поверхности трубы на 7 мм. Все провода и термоэлектроды выведены через верхнюю резиновую пробку.

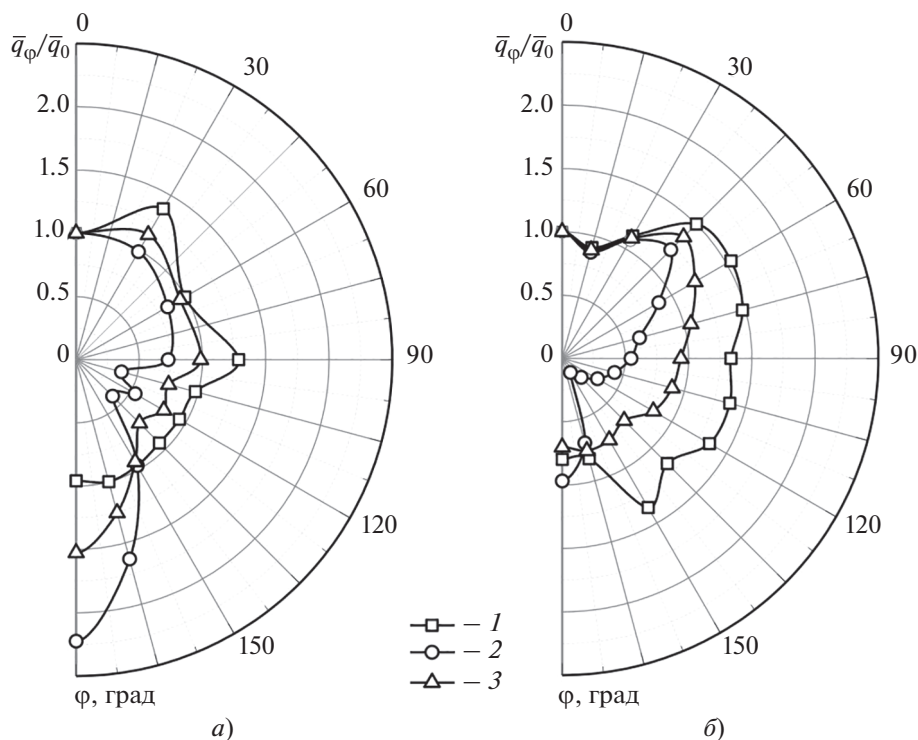
Регистрация термоЭДС ГДТП и термопар производилась модернизированным светолучевым осциллографом Н-145. Применение аналогового прибора вызвано низкой вольт-ваттной чувствительностью ГДТП  $S_0 = 1.3$  мВ/Вт. Провода ГДТП и термопар подключались к клеммам петлевых гальванометров марки “Вибратор” М1012, зеркала которых поворачивались в зависимости от значения сигнала. Ртутная лампа осциллографа Н-145 была заменена на 10 лазерных модулей, лучи которых отражались от зеркал гальванометров на удаленную шкалу, образуя “световые пятна”. Собственная частота гальванометров составляет 40 Гц. Видеокамера Casio Exilim EX-FH20 фиксировала положение “светового пятна”, оцифровка перемещений “световых пятен” выполнена в программе ImageJ [13]. Средняя продолжительность видеозаписи составляла 17 с, частота видеозаписи – 30 Гц. После оцифровки сигналов ГДТП и термопар мгновенные значения усреднялись по времени.

На рис. 2 представлены временные теплограммы – зависимости плотности теплового потока от времени  $\tau$ , построенные по показаниям ГДТП при



**Рис. 2.** Временные теплограммы при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности вертикальной трубы, полученные с помощью градиентных датчиков теплового потока. ГДТП (расстояние от верхнего среза трубы  $x$ , мм): а – № 2 (300); б – № 4 (700); в – № 5 (800)

конденсации насыщенного водяного пара на вертикальной трубе. Датчики регистрируют пульсации плотности теплового потока, связанные с нестационарностью процесса. На расстоянии 300 мм от верхнего среза трубы в месте установки ГДТП № 2 (рис. 2, а) средняя плотность теплового потока составляет  $130 \text{ кВт/м}^2$ , а пульсации плотности теплового потока достигают  $\pm 20\%$  среднего значения. На расстоянии 700 мм в месте установки ГДТП № 4 режим течения конденсата – волновой с числом Рейнольдса  $Re_4 \approx 945$ . (В качестве характерного размера при расчете числа Рейнольдса выбран эквивалентный гидравлический диаметр пленки  $d_{\text{эКВ}} = 4\delta_0$ , где  $\delta_0$  – средняя толщина пленки.) Средняя плотность теплового потока по показаниям ГДТП № 4 (рис. 2, б) составляет  $50 \text{ кВт/м}^2$ , пульсации плотности теплового потока –  $\pm 60\%$



**Рис. 3.** Угловые теплограммы при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы при угле отклонения от вертикали  $\psi = 20^\circ$  (а) и  $\psi = 80^\circ$  (б). ГДТП: 1 – № 2; 2 – № 4; 3 – № 5

среднего значения. На расстоянии 800 мм, в месте установки ГДТП № 5, число Рейнольдса составляет  $Re_5 \approx 1080$ . С помощью ГДТП № 5 (рис. 2, в) регистрируются периоды до 2 с при постоянной плотности теплового потока, такие периоды могут быть связаны с образованием сложных волн на поверхности пленки. Средняя плотность теплового потока по показаниям ГДТП № 5 составила  $20 \text{ кВт/м}^2$ , уровень пульсаций плотности теплового потока превышает среднее значение в 2 раза. Средний по длине вертикальной трубы КТО равен  $6.06 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

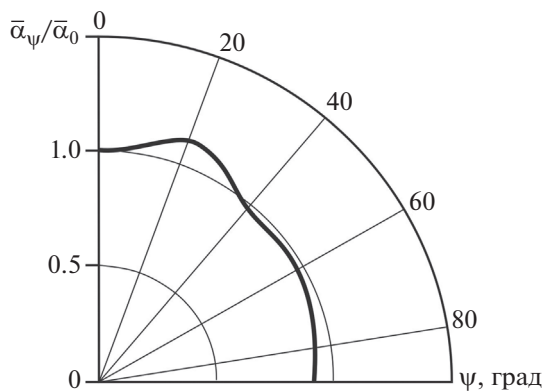
Опыты на вертикальной трубе подтвердили применимость ГДТП из монокристаллического висмута для изучения теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара и показали их высокую информативность. Цель дальнейших экспериментов – определить возможности использования градиентной теплотометрии для оценки интенсификации теплообмена.

Одним из простейших и недооцененных способов интенсификации теплообмена при конденсации является наклон труб, при котором течение конденсатной пленки усложняется и под воздействием силы тяжести и вязкости разбивается на две зоны: основную и поддонную. Опыты выполнялись при отклонении ранее описанного экспериментального участка от вертикали в диапазоне

$\psi = 0^\circ - 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Поворот трубы вокруг оси в диапазоне азимутального угла  $\phi = 0^\circ - 180^\circ$  с шагом  $15^\circ$  позволил оценить распределение местной плотности теплового потока по периметру трубы.

Обобщение экспериментальных результатов представлено в полярных координатах – угловых теплограммах, на которых плотность теплового потока приведена к относительному виду: осредненная местная плотность теплового потока  $\bar{q}_\phi$  отнесена к ее значению на верхней образующей трубы  $\bar{q}_0$ . При отклонении трубы от вертикали на  $\psi = 20^\circ$  (рис. 3, а) ГДТП № 2 указывает на практически равномерное распределение плотности теплового потока; ГДТП № 4 и 5, установленные на значительном удалении от верхнего среза трубы, фиксируют интенсификацию теплообмена в нижней части трубы. Увеличение плотности теплового потока вызвано нарушением сплошности пленки и ее отрывом от поверхности. При увеличении угла наклона до  $\psi = 80^\circ$  (рис. 3, б) ГДТП регистрируют образование поддонной зоны в диапазоне  $\phi = 150^\circ - 210^\circ$ .

Зависимость КТО от угла наклона трубы представлена на рис. 4, значения КТО также приведены к относительному виду: средний КТО  $\bar{\alpha}_\psi$ , соответствующий углу наклона измерительного участка на угол  $\psi$ , отнесен к его значению на вер-



**Рис. 4.** Зависимость относительного КТО от угла наклона  $\psi$  при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы

тикальной трубе  $\bar{\alpha}_0$ . Как видно из этого рисунка, интенсификация теплообмена наблюдается при угле наклона от  $10^\circ$  до  $40^\circ$ . При малом отклонении трубы поддонная зона не образуется и в нижнем секторе течение конденсата усложняется. Наибольший средний КТО в условиях проводимых опытов наблюдается при  $\psi = 20^\circ$  и составляет  $6.94 \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , что на  $14.9\%$  превышает значение, полученное на вертикальной трубе.

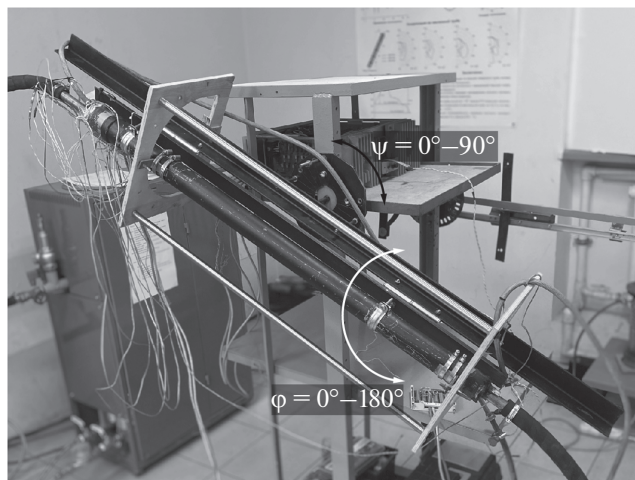
Относительная стандартная неопределенность измерения местной плотности теплового потока с помощью модернизированного светолучевого осциллографа составила  $7.5\%$ , температуры методом полуискусственных термопар –  $2.5\%$ , неопределенность расчета КТО не превысила  $9\%$ .

Результаты экспериментов подтвердили применимость ГДТП для изучения теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности труб. Метод позволяет оценить распределение местной плотности теплового потока по поверхности трубы.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

Первые результаты экспериментов по конденсации водяного пара внутри вертикальных труб опубликовал в 1935 г. Якоб [14]. Развитие систем пассивного отвода тепла (СПОТ) в ядерной энергетике привело к появлению экспериментальных исследований теплообмена при конденсации водяного пара внутри труб [4, 6, 7]. Решение этой задачи актуально и применительно к геотермальным и петротермальным электростанциям, на которых пар конденсируется на внутренней поверхности труб [15].

Обзор работ, посвященных изучению теплообмена при конденсации пара внутри труб, под-



**Рис. 5.** Модернизированная экспериментальная установка для исследования конденсации пара на внутренней поверхности трубы

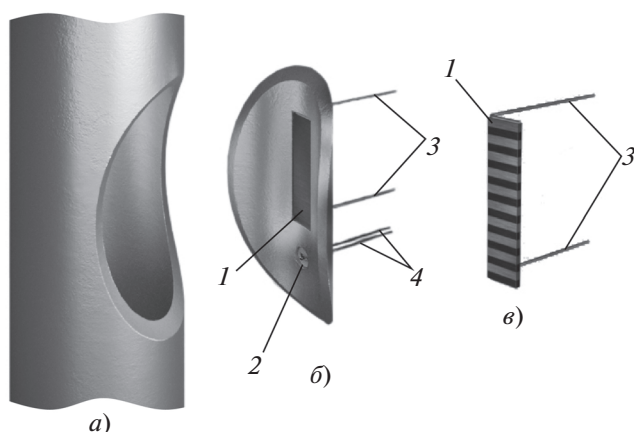
твердил популярность термометрии и выявил ее недостатки: инвазивность, инерционность, необходимость прецизионной установки термопар, точность которой существенно влияет на неопределенность результатов. При решении задачи авторы использовали возможности градиентной теплотометрии. К изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара внутри труб применялись ГДТП размерами  $10.0 \times 3.0 \times 0.3 \text{ мм}$  из композиции сталь 12X18H9T + Ni.

Основное требование к экспериментальной установке (рис. 5) – минимизация искажений течения конденсатной пленки при естественном течении конденсата. Для этого производилась специальная установка ГДТП на внутренней поверхности трубы.

С помощью электроискрового станка на разных расстояниях от верхней кромки трубы были вырезаны четыре сегмента. В каждом сегменте (рис. 6) были выфрезерованы выемки под ГДТП, а также отверстия для отвода проводов и термоэлектродов.

Гетерогенные градиентные датчики теплового потока из композиции сталь 12X18H9T + Ni были установлены в сегментах заподлицо с поверхностью и зафиксированы эпоксидным клеем на одной образующей трубы на разных расстояниях  $x$  от верхнего среза измерительного участка:

ГДТП	$x$ , мм
№ 1 .....	300
№ 2 .....	500
№ 3 .....	700
№ 4 .....	900



**Рис. 6.** Сегмент трубы для изучения конденсации насыщенного водяного пара на внутренней поверхности трубы.  
*a* – труба с выемкой под измерительную вставку; *б* – измерительная вставка; *в* – ГГДТП;  
 1 – ГГДТП; 2 – термопара; 3 – провода от ГГДТП; 4 – термоэлектроды

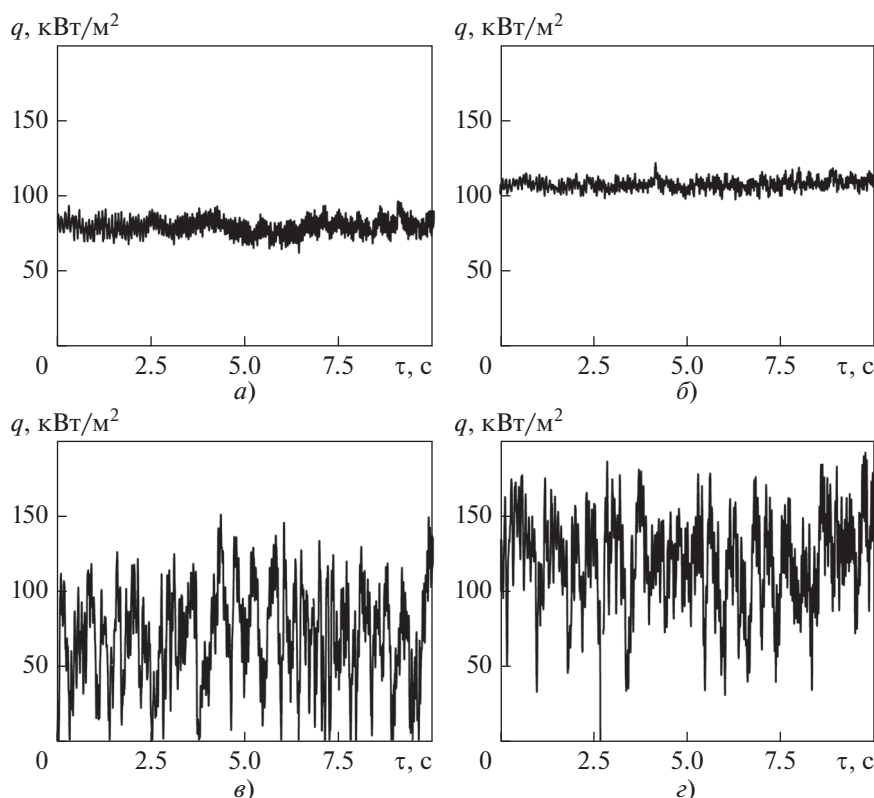
Излишки клея удалялись бормашиной, а поверхность зашлифовывалась. После установки ГГДТП и хромель-алюмелевой термопары (ХА) каждый сегмент впаивался обратно в трубу. Ввиду

малой толщины реза (около 0.2 мм) – слоя удаленного материала в результате вырезания сегмента – впаиванный сегмент не создает уступов на внутренней поверхности трубы и течение конденсатной пленки практически не искажается. На внешней поверхности трубы с обратной от сегмента стороны монтировалась дополнительная термопара типа ХА.

Труба с установленными сегментами и термопарами помещалась в пластиковый кожух и фиксировалась в нем двумя резиновыми пробками. Провода от ГГДТП и термопар выводились через верхнюю резиновую пробку без нарушения герметичности.

При вертикальном положении трубы насыщенный водяной пар под атмосферным давлением подавался сверху; его расход составлял 4.4 г/с. Регистрация термоЭДС ГГДТП и сигналов термопар выполнялась с помощью измерительно-вычислительного комплекса National Instruments.

Временные теплотграммы при конденсации насыщенного водяного пара на внутренней поверхности вертикальной трубы показаны на рис. 7. Датчиками № 3 и 4 регистрируются пульсации плотности теплового потока, вызванные волнообразованием на поверхности пленки.



**Рис. 7.** Временные теплотграммы при конденсации насыщенного водяного пара на внутренней поверхности вертикальной трубы.  
 ГГДТП: *a* – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4  
 Расстояние от верхнего среза трубы *x*, мм: *a* – 300; *б* – 500; *в* – 700; *г* – 900

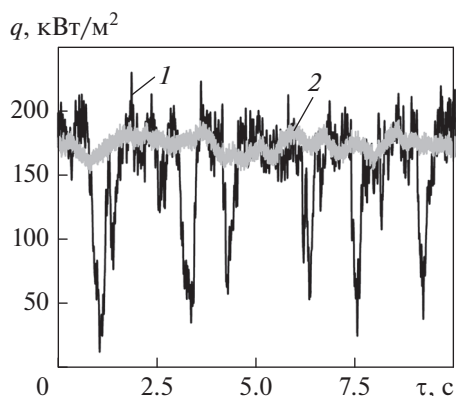


Рис. 8. Показания ГГДТП (1) и термопары (2) при конденсации насыщенного водяного пара на внутренней поверхности трубы

На рис. 8 представлены временные теплограммы, полученные экспериментально с помощью ГГДТП и рассчитанные по показаниям термопар. Из этого рисунка видно, что термопары практически не фиксируют колебания теплового потока и поэтому не дают полной картины теплообмена.

Изучение теплообмена внутри наклонной трубы потребовало доработки стенда. Экспериментальный участок крепили к устройству, которое позволяло отклонять трубу от вертикали на угол  $\psi$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $15^\circ$ . Это устройство обеспечивало поворот трубы на азимутальные углы  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$

с шагом  $30^\circ$ . Таким образом, с помощью одного ГГДТП и одной термопары удалось получить распределения теплового потока и температуры по внутреннему периметру трубы.

Результаты опытов представлены в полярных координатах, где КТО приведены к относительному виду (аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе): осредненная местная плотность теплового потока  $\bar{q}_\varphi$  соотносилась с ее значением  $\bar{q}_0$  на верхней образующей трубы.

На рис. 9 показаны распределения безразмерной плотности теплового потока по периметру трубы при наклоне экспериментального участка на  $\psi = 60^\circ$  и  $90^\circ$ . На этом рисунке видно снижение КТО в нижнем секторе трубы, связанное со скоплением конденсата. При наклоне трубы максимальный по периметру КТО наблюдается при  $\psi = 60^\circ$ , что может быть обусловлено сложным течением конденсата по внутренней поверхности трубы.

На рис. 10 приведена зависимость относительной усредненной плотности теплового потока при отклонении экспериментального участка от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Средняя плотность теплового потока при наклоне трубы на угол  $\psi$  ( $\bar{q}_\psi$ ) отнесена к значению средней плотности теплового потока при конденсации насыщенного водяного пара внутри вертикальной трубы  $\bar{q}_0$ . Максимум плотности теплового потока достигается при отклонении трубы от вертикали на угол  $60^\circ$ .

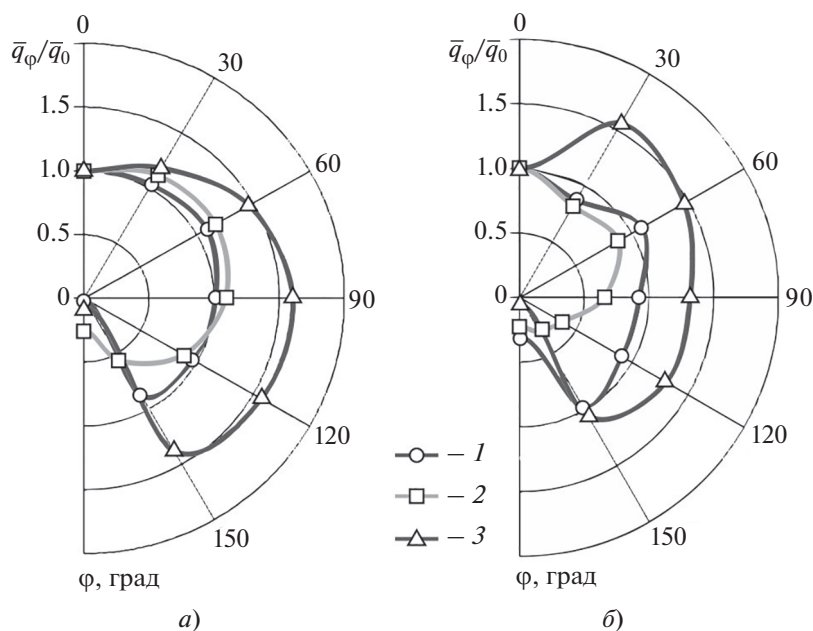


Рис. 9. Угловые теплограммы при конденсации насыщенного водяного пара на внутренней поверхности трубы при угле наклона экспериментального участка  $60^\circ$  (а) и  $90^\circ$  (б). ГГДТП: 1 – № 1; 2 – № 3; 3 – № 4

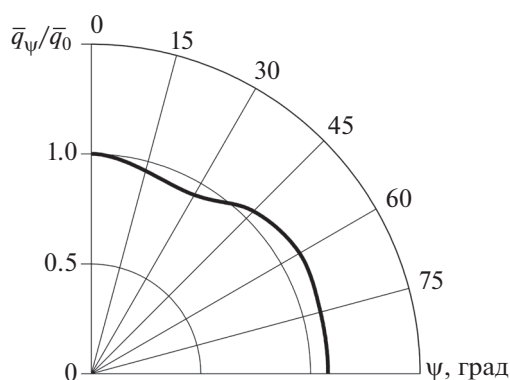


Рис. 10. Зависимость относительной плотности теплового потока от угла наклона трубы

Как показали оценки авторов, относительная стандартная неопределенность измерения плотности теплового потока и расчета КТО при конденсации внутри трубы не превысила 9%.

### ВЫВОДЫ

1. Градиентные датчики теплового потока из монокристаллического висмута могут быть использованы для изучения теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности, а ГГДТП из композиции сталь 12X18H9T + Ni – на внутренней поверхности труб.

2. Показания ГДТП и ГГДТП позволяют оценить распределение плотности теплового потока по периметру трубы и сделать выводы об изменении толщины конденсатной пленки, скоплении конденсата в нижней части трубы, волнообразовании и т.п. Совмещение теплотрии и термометрии дает возможность рассчитывать средние значения КТО с относительной стандартной неопределенностью не более 9%.

3. Экспериментальные исследования конденсации насыщенного пара на наружной поверхности наклонной трубы показали, что интенсификация теплообмена наблюдается при отклонении трубы от вертикали на угол от  $10^\circ$  до  $40^\circ$ . Максимальный средний КТО получен при  $\psi = 20^\circ$  и составил  $6.94 \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , что на 14.9% превышает значение на вертикальной трубе.

4. Использование ГГДТП для изучения теплообмена внутри наклонной трубы дало возможность выявить оптимальный угол наклона, который в условиях опыта составил  $\psi = 60^\circ$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Development** of a new empirical correlation for steam condensation rates in the presence of air outside vertical smooth tube / G. Fan, P. Tong, Z. Sun, Y. Chen // *Ann. Nucl. Energy*. 2018. V.113. P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.021>

2. **Lee Y.G., Jang Y.J., Choi D.J.** An experimental study of air – steam condensation on the exterior surface of a vertical tube under natural convection conditions // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 104. P. 1034–1047. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.016>

3. **Zhang J.X., Wang L.** Experimental study of air accumulation in vapor condensation across horizontal tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 111. P. 860–870. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.010>

4. **Local** heat transfer during reflux condensation mode in a U-tube with and without noncondensable gases / K.-W. Lee, H.C. No, I.-C. Chu, Y.M. Moon, M.-H. Chun // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2006. V. 49. P. 1813–1819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.11.011>

5. **Nada S.A., Hussein M.S.** General semi-empirical correlation for condensation of vapor on tubes at different orientations // *Int. J. Therm. Sci*. 2016. V. 100. P. 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.023>

6. **Havlík J., Dlouhý T.** Condensation of the air-steam mixture in a vertical tube condenser // *EPJ Web Conf*. 2016. V. 114. P. 02037. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402037>

7. **Kubín M., Hirš J., Plášek J.** Experimental analysis of steam condensation in vertical tube with small diameter // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 94. P. 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.022>

8. **Lel V.V., Al-Sibai F., Renz U.** Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique // *Exp. Fluids*. 2005. V. 39. P. 856–864. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0020-x>

9. **Sapozhnikov S., Mityakov V., Mityakov A.** *Heatmetry: The science and practice of heat flux measurement*. Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40854-1t>

10. **Investigation** of flow and heat transfer at the circular fins / V. Mityakov, A. Gusakov, V. Seroshtanov, M. Grekov // *MATEC Web Conf*. 2018. V. 245. P. 06001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824506001>

11. **The study** of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces / S.Z. Sapozhnikov, V.Y. Mityakov, A.V. Mityakov, A.Y. Babich, E.R. Zainullina // *Tech. Phys. Lett*. 2019. V. 45. Is. 4. P. 321–323. <https://doi.org/10.1134/S1063785019040163>

12. **Исследование** конденсации насыщенного пара методом градиентной теплотрии / А.Ю. Бабич, Э.Р. Зайнулина, В.В. Субботина, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // *Вестник Рыбинской гос. авиац. технол. академии им. П.А. Соловьева*. 2018. № 1 (44). С. 44–49.

13. **Tinevez J.Y., Perry N., Schindelin J.** TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking // *Methods*. 2019. V. 115. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2016.09.016>

14. **Jakob M., Erk S., Eck H.** Improved measurements and calculations of the heat transfer for flowing steam condensing in a vertical tube // *Phys. Zeitschrift*. 1935. Bd 36. S. 73.

15. **Muratov P.V., Pashkevich R.I.** Reflux condensation of steam inside a short vertical large diameter tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2015. V. 91. P. 494–501. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.075>



## An Investigation into Film Condensation of Saturated Steam on Tube Surfaces by a Gradient Heatmetry Method

S. Z. Sapozhnikov<sup>a</sup>, V. Yu. Mityakov<sup>a</sup>, A. V. Mityakov<sup>a</sup>, A. Yu. Babich<sup>a</sup>, and E. R. Zainulina<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

\*e-mail: zaynullinaelza@gmail.com

**Abstract**—Gradient heat-flux measurement (heatmetry) is a modern technology for measuring heat flux using gradient-type sensors. Since 2015, gradient heatmetry has been used to study heat transfer in film condensation of saturated steam on the inner and outer surface of tubes. This measurement method offers greater information capabilities than the more widely used thermometry when the heat flux is calculated from the temperature measured with thermocouples. The advantage of gradient heatmetry results from abnormally fast response of sensors whose time constant is  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  s. Therefore, they may be considered almost inertialess measuring devices. Direct measurement of heat flux reduces the total uncertainty in calculating local and average heat-transfer coefficients. Heat transfer in film condensation of saturated steam on the outer and inner surfaces of tubes was studied using gradient heatmetry. Gradient heat-flux sensors (GHFS) made of monocrystalline bismuth were used on the outer surface, while heterogeneous GHFSs made of Grade 12Kh18N9T steel + Ni composition were installed on the inner surface. In both cases, reference tests were performed on vertical tubes. Their results confirmed the excellent information capability of this approach and its applicability for estimating heat flux. A series of experiments was carried out to study heat transfer during film condensation of saturated steam on the outer and inner surfaces of inclined pipes. The highest heat-transfer coefficient of 6.94 kW/(m<sup>2</sup> K) in condensation of saturated steam vapor on the outer surface of a tube is observed for the tube inclined at an angle of 20° to the vertical. This value exceeds the heat-transfer coefficient on a vertical tube by 14.9%. The highest heat-transfer rate in condensation on the inner surface was observed for the tube inclined at 60° to the vertical.

**Keywords:** gradient heatmetry, gradient heat-flux sensors, film condensation, saturated steam, heat flux, heat-transfer coefficient, time and angle thermograms