Инж. О.Л. Марченко, инж. К.В. Присняков (ИГТМ НАН Украины) ТЕПЛООБМЕН В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ УГЛАМИ НАКЛОНА

Вперше отримано експериментальні дані по роботі теплової труби на складних комплексних нестаціонарних режимах при сумісному впливу вібраційних та гравітаційних полів. На відміну від робіт попередніх авторів усі процеси досліджено в динаміці. Проведено аналіз експериментальних даних, що дало змогу отримати практичні рекомендації та зробити відповідні висновки щодо експлуатації теплових труб при вищезгаданих умовах.

HEAT EXCHANGE IN THE THERMAL PIPE AT INFLUENCE OF VIBRATIONS WITH VARIABLE CORNERS OF THE INCLINATION

For the first time experimental data on work of a thermal pipe on complex non-stationary modes are received at joint influence of vibrating and gravitational fields. As against works of the previous authors all processes are investigated in dynamics. The analysis of experimental data that has enabled to receive practical recommendations is lead and to draw corresponding conclusions on operation of thermal pipes under the above mentioned conditions

Тепловые трубы (TT) нашли широкое применение в различных теплотехнических агрегатах, как устройства, позволяющие передавать большие тепловые потоки. Средняя тепловая труба способна проводить тепловые потоки в сотни и тысячи раз больше, чем у широко известных конструкционных материалов с большим коэффициентом теплопроводности λ .

Внутри тепловой трубы протекают сложные тепломассообменные процессы испарения, конденсации, движения жидкой фазы по пористым или капиллярным структурам, поэтому существующие методики их расчета и проектирования зачастую носят рекомендательный характер. Тепловые трубы являются объектом дальнейших научных исследований.

На работу тепловых труб сильно влияют условия эксплуатации. Поскольку конвекция происходит в поле массовых сил, то режим работы тепловой трубы, установленной, например, на летательном аппарате и движущемся с огромным ускорением или совершающего необходимый маневр, будет существенно отличаться от режима работы на земле.

Кроме того, в силу ряда факторов, имеющих место при работе того или иного устройства, практически неизбежно наличие вибраций. В предыдущих работах [1-3] экспериментально показано, что вибрации оказывают значительное влияние на процессы кипения, гидродинамическую картину течения двухфазного теплоносителя, гидравлическое сопротивление двухфазного потока, динамику протекания процесса.

Данная работа представляет определенное обобщение полученных экспериментальных данных по исследованию влияния вибраций и угла наклона на характеристики тепловых труб.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Экспериментальная установка создана на базе электро – вибростенда [4], на рабочем столе которого расположена исследуемая тепловая труба. Устройство крепления выполнено таким образом, что имеется возможность поворота TT в вертикальной плоскости на определенный градус. За нулевой угол поворота принято вертикальное расположение TT, при этом электронагревательный элемент находится внизу.

Исследуемым участком является тепловая труба Ø20 мм, длиной 590 мм. Рабочее тело – вода. Материал стенок – нержавеющая сталь. Длина нагревательного участка 105 мм. По длине ТТ установлено 5 термопар. Первая – непосредственно под нагревателем и четыре равномерно по длине охлаждаемого участка. Точность измерительного прибора ±3 °C. Охлаждаемый участок имеет непосредственный контакт с окружающей средой. Теплообмен осуществляется за счет конвекции и излучения.

Каждая серия экспериментов проводится при постоянных параметрах: угле наклона ТТ α° , температуре окружающей среды $T_{okp.cp.}$, подводимой электрической мощности P[BT] = U[B] I[A], частоте вибраций $f[\Gamma u]$, амплитуде колебаний A[MM].

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: после подачи напряжения на нагревательный элемент в течение определенного времени происходил выход TT на установившийся тепловой режим без вибраций, затем включались вибрации, и продолжался выход на установившийся тепловой режим с вибрациями, после этого вибрации выключались, и происходил возврат на стационарный режим без вибраций. (тепловой режим считался установившимся, если в течение 5 мин температура поверхности трубы изменяется в пределах до $\approx 1 - 2^{\circ}$ С). После включения вибраций показания термопар фиксировались через определенные промежутки времени $\Delta \tau$ (в данной серии опытов 5 – 10 мин) и заносились в таблицу.

<u>Результаты экспериментов</u> в разностном ΔT_i и относительном T_i / T_{i0} виде сведены в табл. 1 – 4 для каждого угла наклона, где ΔT_i [°C] – разность между температурой стенки без вибраций и при наличии вибраций, а T_i / T_{i0} отношение температуры стенки при наличии вибраций к температуре стенки ТТ без вибраций (*i* – номер термопары). В данной работе представлены показания для углов поворота $\alpha = 0^\circ$, 45°, 90° и 135°. По табличным данным построены зависимости разностной и относительной температуры от времени.

Во всех экспериментах: $T_{okp,cp} \approx 25^{\circ}$ С, мощность U = 17 В, I = 5А, P = 85 Вт, $q_{yd} = 2578101$ Вт/м², частота f = 40 Гц, амплитуда A = 5 мм.

f	Δτ	ΔT_{I}	T_{1}/T_{10}	ΔT_2	T_2/T_{20}	ΔT_3	T_{3}/T_{30}	ΔT_4	T_{4}/T_{40}	ΔT_5	T5/T50
40	0	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00
40	5	17	0,89	16	0,89	15	0,90	15	0,90	39	0,50
40	10	19	0,88	18	0,88	18	0,88	17	9,89	43	0.44
40	15	18	0,88	17	0,89	17	0,89	16	0.89	42	0,46
0	20	2	0,98	1	0,99	0	1.00	0	1,00	13	0,83
0	25	-2	1,01	-3	1,01	-3	1,01	-4	1,02	0	1,00

Таблица I – Экспериментальные данные для $\alpha = 0^{\circ}$

Таблица 2 – Экспериментальные данные для $\alpha = 45^{\circ}$

ſ	Δτ	ΔT_{I}	T_{1}/T_{10}	ΔT_2	T_2/T_{20}	ΔT_3	T_{3}/T_{30}	ΔT_4	T4/T40	ΔT_5	T5/T50
40	0	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000
40	8	6	0,962	6	0,961	6	0,961	6	0,961	16	0,781
40	**18	7	0,955	7	0,955	6	0,961	7	0,955	19	0,740
40	28	6	0,962	7	0,955	6	0,961	7	0,955	19	0,740
0	38	-5	1,032	-5	1,032	-6	1,039	-6	1,039	-14	1,192

Таблица 3 – Экспериментальные данные для $\alpha = 90^{\circ}$

ſ	Δτ	ΔT_{I}	T_{1}/T_{10}	ΔT_2	T_2/T_{20}	ΔT_3	T_{30}	ΔT_4	T4/T40	ΔT_5	T5/T50
40	0	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000
40	5	7	0,953	7	0,952	7	0,951	9	0,934	15	0,857
40	10	8	0,946	7	0,952	7	0,951	10	0,927	16	0,848
40	15	8	0,946	7	0,952	7	0,951	10	0,927	17	0,838
0	20	1	0,993	1	0,993	0	1,000	3	0,978	-8	1,076
0	25	-6	1,041	-6	1.041	-6	1.042	-5	1,036	-22	1,210
0	30	-7	1,047	-8	1,055	-7	1,049	-7	1,051	-25	1,238
0	65	-9	1,061	-9	1,062	-9	1,063	-8	1,058	-27	1,257

Таблица 4 – Экспериментальные данные для $\alpha = 135^{\circ}$

ſ	Δτ	ΔT_{I}	T_{1}/T_{10}	ΔT_2	T_{20}	ΔT_3	T3/T30	ΔT_4	T_{4}/T_{40}	ΔT_5	T_5/T_50
40	0	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000	0	1,000
40	5	8	0,986	4	0,955	7	0,857	5	0,872	12	0.745
40	15	11	0,980	5	0,944	12	0,755	8	0,795	15	0,681
40	20	13	0,977	5	0,944	13	0,735	8	0,795	15	0,681
0	30	2	0,996	1	0,989	10	0,796	9	0,769	16	0,660

Как видно из графика (рис. 1) при наличии вибровоздействий наблюдается уменьшение температуры стенки ТТ. Это происходит не мгновенно, а в течение определенного времени, и для данного случая составляет 10-15 мин. Угол наклона ТТ в данном эксперименте составляет $\alpha = 0^{\circ}$. Поскольку при



Рис. 1 – Изменение температуры стенки TT при воздействии вибраций для $\alpha = 0^{\circ}$

наложении внешних вибровоздействий температура стенки уменьшается, то ΔT получается положительной. Вибрации включаются при $\tau = 0$ мин, и выдерживаются до наступления стационарного теплового режима. На данном графике можно наблюдать динамику изменения ΔT . После выключения вибраций температура стенки начинает возвращаться к первоначальному значению и ΔT устремляется к нулю. Отрицательные значения ΔT свидетельствуют о наличии гистерезиса в данном процессе, т.е. после выключения вибраций температура стенки становится выше начальной. На данное явление следует обратить особое внимание, поскольку при значительных тепловых нагрузках это может стать причиной аварии. Другим заслуживающим внимания фактором является тепловой режим периферийного участка, где установлена термопара T_s . Влияние вибраций имеет здесь максимальный эффект. Падения температуры стенки в упоминаемом эксперименте составляет от 16 – 19°C до 43°C на периферийном участке.

На графике (рис. 2) показана динамика изменения температуры стенки в том же эксперименте. Относительная температура определялась как отношение температуры на установившемся режиме при наличии вибраций к температуре в той же точке до включения вибраций. Относительное падение температуры составляет 11 – 12% по основной длине и до 56% на периферии.



Рис. 2 – Относительное изменение температуры стенки TT при воздействии вибраций для $\alpha = 0^{\circ}$

Изменение температуры стенки в динамике при вибровоздействиях для угла наклона $\alpha = 45^{\circ}$ (рис. 3), достигает 6 – 7°С по основной длине и 19°С на периферии, что составляет 0,038 – 0,045 до 0,26 от начальной температуры (рис. 4). Как и в предыдущем эксперименте наблюдается гистерезис до -14°С.

При горизонтальном расположении ТТ ($\alpha = 90^{\circ}$) падение температуры стенки составляет от 7 – 10°С до 17°С (рис. 5).

Относительное изменение температуры при вибрациях составляет 0,048 - 0,162 от начальной, что в динамике показано на графике (рис. 6).



Рис. 3 – Изменение температуры стенки TT при воздействии вибраций для $\alpha = 45^{\circ}$



Рис. 4 – Относительное изменение температуры стенки TT при воздействии вибраций для $\alpha = 45^{\circ}$



Рис. 5 – Изменение температуры стенки ТТ при воздействии вибраций для $\alpha = 90^\circ$



Рис. 6 – Относительное изменение температуры стенки TT при воздействии вибраций для $\alpha = 90^{\circ}$

При угле наклона $\alpha = 135^{\circ}$ распределение изменения температуры более равномерное, чем в предыдущих случаях (рис. 7). Отметим, что при данном угле поворота значительно ухудшаются характеристики ТТ. Данное явление можно объяснить следующим образом – при угле поворота больше 90° зона испарения (подвода тепла) оказывается выше зоны конденсации, парообразное рабочее тело за счет конвекции устремляется вверх, а жидкая фаза собирается внизу, при этом ТТ перестает работать как устройство. О том, что жидкая фаза собирается внизу, можно судить по показаниям периферийных термопар T_4 и T_5 . Из графика видно, что после выключения вибраций температуры в этих точках продолжают уменьшаться. Можно сделать вывод, что на двухфазный поток вибрации оказывают более существенное влияние, чем на однофазный.



Рис. 7 – Изменение температуры стенки ТТ при воздействии вибраций для α =135°.

С точки зрения применения TT на устройствах, которые изменяют свое положение относительно вектора гравитационных сил, режим эксплуатации при углах наклона больше 90° является весьма опасным, поскольку теплопроводность значительно ухудшается.

Относительное изменение температуры для режима $\alpha = 135^{\circ}$ составляет 0,02 - 0,32 (рис. 8).



Рис. 8 – Относительное изменение температуры стенки ТТ при воздействии вибраций для α≈135°.

Обобщенные результаты представлены на графиках (рис. 9 – рис. 11).



Рис. 9 – График абсолютной температуры стенки ТТ без воздействия вибраций для различных α°



Рис. 10 – График разностной температуры стенки ТТ при воздействии вибраций для различных α°



Рис. 11 – График относительной температуры стенки на установившемся режиме для различных α°

На рис. 10 представлен обобщенный график разностной температуры ΔT между температурой стенки при вибрациях и без вибраций на установившихся режимах и для различных углов поворота.

<u>Анализ экспериментальных данных</u> показывает, что влияние вибраций и угла поворота оказывает значительное влияние на протекающие ТМО процессы в тепловой трубе, также наблюдается совместное влияние вышеупомянутых факторов.

Наличие вибраций улучшает теплообмен. Данный факт отчетливо виден на графиках (рис. 1 – рис. 11). При наличии вибровоздействий температура стенки по всей длине ТТ уменьшается от 0,04 до 0,56, особенно на удаленной от нагревателя термопаре 5. Это можно объяснить увеличением теплосъема от нагревателя и большим выделением тепла в окружающую среду с охлаждаемой части трубы.

Влияние угла поворота без наличия вибраций показано на графике рис. 9 и выражается в следующем – наилучшим с точки зрения теплообмена следует считать вергикальное расположение TT с подводом тепла снизу. В экспериментальных. данных этот угол $\alpha = 0^{\circ}$. Наихудшим является вертикальное расположение при подводе тепла сверху $\alpha = 180^{\circ}$. Эксперименты при $\alpha = 180^{\circ}$ не проводились, так как наблюдалось чрезмерное повышение температуры в районе нагревателя, и существовала вероятность выхода со строя TT. Промежуточные положения угла влияют на теплообмен нелинейно. В промежутке от $\alpha = 0^{\circ}$ до $\alpha = 90^{\circ}$ значительных изменений не наблюдается, но при углах больше $\alpha = 90^{\circ}$ наступает резкое ухудшение теплообмена, температура трубы в районе нагревателя стремительно возрастает, а по длине – падает.

Совместное влияние вибраций и угла поворота показано на рис. 10 и рис. 11. Как видно из графиков при $\alpha = 0^{\circ}$ вибровоздействия оказывают наибольшее влияние, при $0^{\circ} < \alpha < 45^{\circ}$ эффекты можно охарактеризовать, как промежуточные, при углах $45^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$ наблюдается незначительный рост влияния, а при $\alpha > 90^{\circ}$ вклад вибраций выражается по разному для разных участков трубы.

Полученные выводы согласуются с полученными ранее [1 - 3], в которых наблюдалась интенсификация тепломассообменных процессов с вибрациями при кипении в большом объеме, вынужденном течении неадиабатного двухфазного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Присняков, С. Бондаренко, В. Луценко, Ю. Николаенко, К. Присняков, В. Штангеев, В. Елиссев «Тепломассообмен и вибрация». Київ, Наукова думка 2001.

2. K. Prisniakov, Yu. Nikolaenko, O. Marchenko, V. Kravetz, V. Prisniakov. About Complex Influence of Vibrations and Gravitational Fields on Serviceability of Heat Pipes in Composition of the Space-Rocket Systems Paper-Nr. : IAC-03-1.1.10. 54th International Astronautically Congress. Bremen, Germany. September 29 - October 3, 2003; http://www.aiaa.org/iat2003. Tracking Number: 16490

3. K. Prisniakov, O. Marchenko, Yu. Mclikaev, Yu. Nikolaenko, V. Prisniakov. About Functioning of the Heat Pipe in Condition of Gravity and Vibration. Paper C-1. 7th International Heat Pipe Symposium. October 12 - 16, 2003. Seogwipo KAL Hotel, Jeju-D0, Korea. 9 p.

 Присняков К.В., Марченко О.Л., Габринец В.А. «Экспериментальный стенд для исследования процессов теплообмена в условиях вибронагрузок». Проблемы высокотемпературной техники. Список научных трудов. – Дніпропетровськ, ДДУ 1996. – С. 25 - 31.