

DOI: 10.17516/1999-494X-0413

УДК 532.6

The Effect of the Tilt Angle of the Slot Channel on Water Runoff

Evgeniy N. Vasil'ev* and Dmitriy P. Emel'yanov
*Institute of Computational Modelling SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 25.03.2022, received in revised form 14.07.2022, accepted 04.08.2022

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of capillary phenomena on water runoff during snow melting in a slotted channel at an inclination angle from the horizontal of 5°, 10°, 15° and 20°. The description of the model of the slotted channel and the technique of carrying out experiments is given. During the experiments, the features of water runoff were revealed depending on the size of the gap and the angle of inclination of the slotted channel. The dependence of the minimum values of the channel gap on the angle of inclination, at which free flow of water is observed without the influence of capillary forces, is obtained. The results obtained can be used in the development of effective methods for removing frost in plate heat exchangers of refrigeration equipment.

Keywords: plate heat exchanger, slot channel, refrigeration unit, runoff of water, capillary constant.

Citation: Vasil'ev, E.N., Emel'yanov, D.P. The effect of the tilt angle of the slot channel on water runoff. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(5), 526–533. DOI: 10.17516/1999-494X-0413

Влияние угла наклона щелевого канала на стекание воды

Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов
*Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния капиллярных явлений на стекание воды при таянии снега в щелевом канале при угле наклона от горизонтали 5°, 10°, 15° и 20°. Приведено описание макета щелевого канала и методики

проведения экспериментов. В ходе экспериментов выявлены особенности стекания воды в зависимости от величины зазора и угла наклона щелевого канала. Получена зависимость минимальных значений зазора канала от угла наклона, при которых наблюдается свободное стекание воды без влияния капиллярных сил. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных методов удаления инея в пластинчатых теплообменниках холодильного оборудования.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, щелевой канал, холодильная установка, стекание воды, капиллярная постоянная.

Цитирование: Васильев, Е. Н. Влияние угла наклона щелевого канала на стекание воды / Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(5). С. 526–533. DOI: 10.17516/1999-494X-0413

Введение

При работе холодильных установок влага, содержащаяся в воздухе холодильной камеры, оседает в виде конденсата или инея на поверхности ребер теплообменника, имеющих пониженную температуру. Экспериментальное исследование инееобразования на поверхности ребер макета теплообменника термоэлектрического блока охлаждения было проведено в работе [1]. По результатам экспериментов установлено, что образовавшийся между ребрами теплообменника слой инея перекрывает часть межреберного промежутка и ухудшает условия теплообмена, поскольку это обуславливает снижение коэффициента теплоотдачи поверхности и сокращение эффективного поперечного сечения промежутка, приводящее к уменьшению расхода воздуха. Обеспечение эффективной работы теплообменника особенно актуально для термоэлектрических систем охлаждения из-за их сравнительно низкой эффективности [2, 3].

Для устранения негативных факторов, вызванных инееобразованием, появившийся иней удаляют из межреберных каналов теплообменников, для этого производятся периодические профилактические оттаивания. Удаление воды может осуществляться как принудительно, например за счет продувки межреберных каналов воздухом, так и путем естественного стекания. Процесс стекания воды из межреберных каналов обеспечивается действием силы тяжести, препятствующий фактор – капиллярные явления, обусловленные действием сил поверхностного натяжения. Характерный размер, при котором начинают проявляться капиллярные явления, определяется капиллярной постоянной [4]

$$a_c = \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_w - \rho_a)}}.$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения, g – ускорение силы тяготения, ρ_w и ρ_a – плотности воды и воздуха. Для воды при температуре $T = 0$ °С капиллярная постоянная $a_c = 3,9$ мм, формула дает оценочное значение характерного значения системы, при котором капиллярные явления становятся существенными. Точные условия, при которых начинают проявляться капиллярные явления, могут быть получены с помощью экспериментов на исследуемом объекте.

Исследования стекания воды в щелевом канале проводились применительно к конструкции термоэлектрического блока охлаждения, использующей пластинчатый теплообменник, от которого теплота передается 24 термосифонами к холодной стороне восьми термоэлектрических модулей (рис. 1а) [5]. Ребра теплообменника выполнены в виде медных прямоугольных пластин, нанизанных на все термосифоны термоэлектрического блока (рис. 1б). Свободное

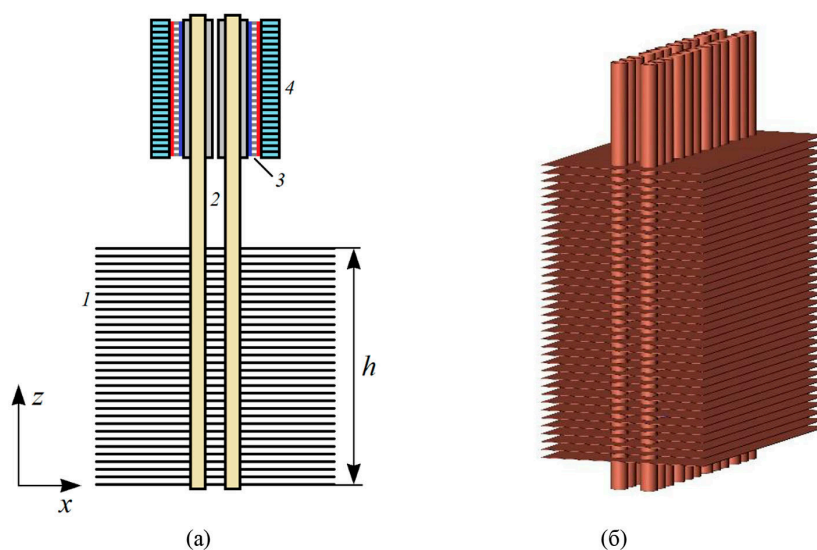


Рис. 1. Схема конструкции термоэлектрического блока (а) и пластинчатого теплообменника (б). 1 – ребра, 2 – термосифоны, 3 – термоэлектрические модули, 4 – жидкостной радиатор

Fig. 1. Design diagram of the thermoelectric block (a) and plate heat exchanger (b). 1 – ribs, 2 – thermosyphons, 3 – thermoelectric modules, 4 – liquid radiator

стекание воды при оттаивании инея обеспечивается за счет установки теплообменника с определенным углом наклона. Для рассматриваемой конструкции теплообменника оптимальными являются малые углы наклона, при которых обеспечивается наибольшая теплопередающая способность термосифонов. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния капиллярных явлений на свободное стекание воды в зависимости от угла наклона и зазора щелевого канала.

1. Описание макета и методики экспериментов

Исследование процесса оттаивания и стекания воды проводилось с помощью макета щелевого канала, имитирующего межреберные каналы теплообменника термоэлектрического блока. Изображение макета щелевого канала приведено на рис. 2. Щелевой канал образован двумя пластинами фольгированного стеклотекстолита, имеющими размер 60×210 мм². Поверхности пластин, покрытые медной фольгой, расположены внутри канала, это обеспечивает, как и в реальном теплообменнике, контакт воды с медной поверхностью. Расстояние между пластинами a определяется толщиной уплотнительных прокладок, закрепленных на краях канала.

При проведении экспериментов внутренний объем щелевого канала заполнялся снегом, его дальнейшее таяние происходило за счет конвективного теплообмена с окружающей средой в течение 10–20 минут. В ходе экспериментов менялись значения угла наклона (5° , 10° , 15° и 20°) и расстояния между пластинами в диапазоне $a = 2,8$ – $5,2$ мм. Плотность набивки снега во внутренний объем макета также варьировалась и составляла от 300 до 500 кг/м³. В ходе экспериментов велось визуальное наблюдение, фотосъемка и проводились измерения исходной массы снега, помещенной в щелевой канал, значений масс воды, оставшихся в канале после свободного стекания и последующего продува канала воздухом со скоростью 3 м/с.

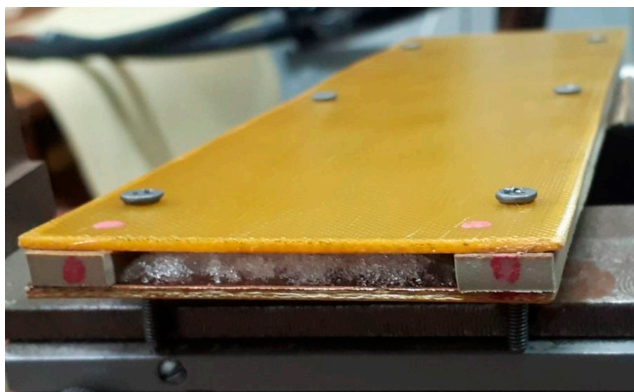
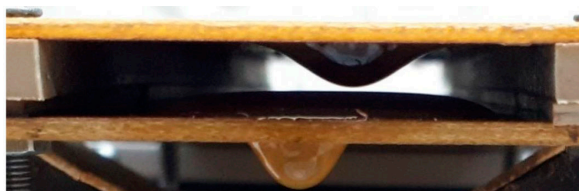


Рис. 2. Макет щелевого канала, заполненный снегом

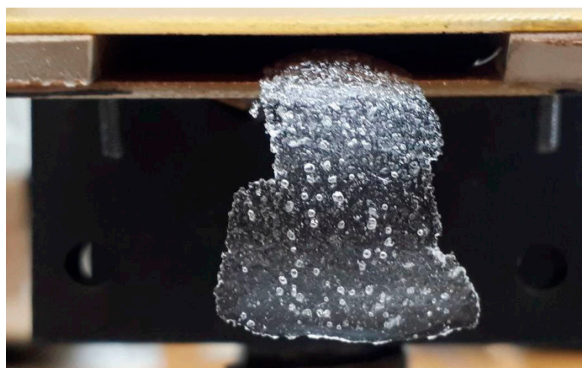
Fig. 2. Model of a slot channel filled with snow

2. Результаты экспериментов

Процесс таяния снега и стекания воды в щелевом канале имеет ряд особенностей и может протекать по-разному даже в экспериментах с одинаковыми параметрами. При таянии слой снега вначале пропитывается водой и уменьшается по толщине, при этом слой может располагаться как на нижней поверхности канала, так и прилипнуть к верхней поверхности. В дальнейшем наблюдается стекание воды с нижней и верхней поверхностей канала в виде капель (рис. 3а). В незначительной части экспериментов при углах наклона 15° и 20° наблюдалось сползание слоя снега, пропитанного водой (рис. 3б).



(а)



(б)

Рис. 3. Стеkanie воды при таянии снега

Fig. 3. Water runoff during snow melting

Процесс стекания воды из межреберных каналов определяется соотношением влияния капиллярных явлений и силы тяжести, которое зависит от зазора и угла наклона канала. При уменьшении зазора щелевого канала роль капиллярных явлений растет, что препятствует стеканию воды. Увеличение угла наклона при прочих равных условиях способствует лучшему удалению воды из канала. При исследовании процессов таяния снега и стекания воды было установлено формирование следующих характерных структур в щелевом канале: полное или частичное перекрытие поперечного сечения канала на выходе (рис. 4а), локальная перемычка между верхней и нижней сторонами канала (рис. 4б), свисающие капли на верхней поверхности канала (рис. 4в), водяная пленка на нижней поверхности у выходного сечения (рис. 4г). Влияния величины начальной плотности снега на характер стекания воды из канала не установлено.

При доминировании капиллярных явлений на нижнем срезе канала после завершения таяния формируется водяная пробка, которая полностью или частично перекрывает поперечное сечение канала (рис. 4а). Величина угла наклона влияет на массу воды, скапливающейся на нижнем срезе канала. При зазоре $a = 2,8$ мм и минимальном угле 5° наблюдалось формирование водяной пробки на выходе из канала. Масса воды в пробке в экспериментах варьировалась в широком диапазоне 0,4–1,6 г, что примерно соответствует толщине пробки 0,4–1,6 см. Увеличение угла наклона до 20° приводило в большей части экспериментов к формированию только частичного перекрытия нижнего среза канала, значение массы воды в пробке достигало 0,7 г. Увеличение зазора снижает влияние капиллярных сил, это обуславливает уменьшение массы воды, остающейся в канале после завершения стекания. Степень перекрытия нижнего среза уменьшается, либо он после завершения таяния остается полно-

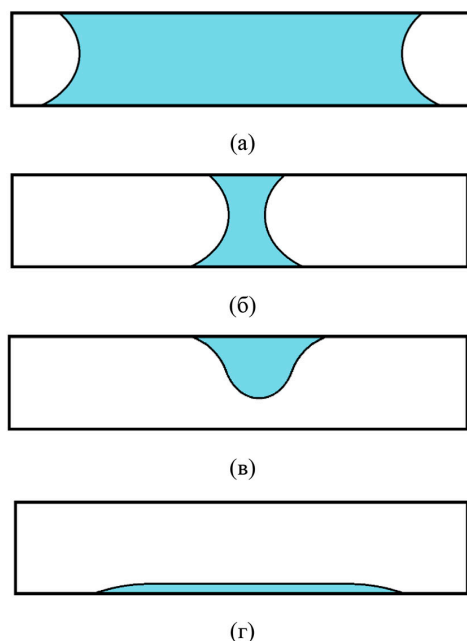


Рис. 4. Характерные водяные структуры, формирующиеся при стекании воды

Fig. 4. Characteristic water structures formed during water runoff

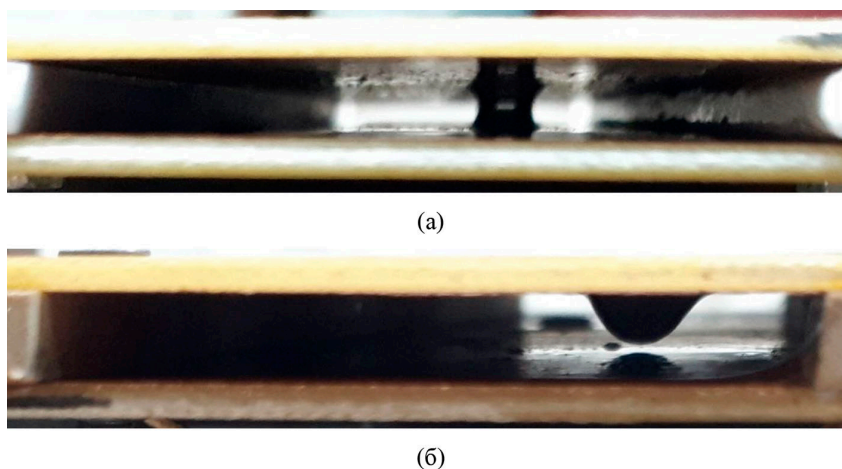


Рис. 5. Остаточные перемычки (а) и висящие капли (б) в щелевом канале, оставшиеся после стекания воды

Fig. 5. Residual jumpers (a) and hanging drops (b) in the slot channel, remaining after the water draining

стью свободным. В части экспериментов после завершения таяния снега и стекания воды наблюдались в глубине канала отдельные перемычки (рис. 5а) и висящие капли (рис. 5б). Принудительный продув щелевого канала воздухом со скоростью 3 м/с был достаточен для удаления оставшихся пробок, перемычек и висящих капель. С определенного значения зазора между пластинами, зависящего от угла наклона канала, вода из канала стекает без формирования перемычек и пробок на выходе. В этом случае незначительное количество воды остается в виде вогнутых менисков в углах канала, также возможен остаточный слой на нижней кромке канала (рис. 4г).

Присутствие остаточной массы воды в межреберных каналах после стекания является негативным фактором для теплообменника. При возобновлении работы холодильной установки оставшаяся вода снова замерзает. При этом поперечное сечение канала или его часть будет заблокирована льдом. Кроме того, замерзание воды может привести к деформации ребер теплообменника. Такие последствия замерзания воды в межреберных каналах приведут к ухудшению эксплуатационных характеристик теплообменника.

По результатам экспериментов, проведенных при разных углах наклона канала α , были установлены минимальные значения зазора a между пластинами, при которых вода во всех случаях стекала без формирования перемычек и пробок на выходе. По этим значениям с помощью интерполяции была получена зависимость $a(\alpha)$, являющаяся границей режимов, соответствующих свободному стеканию воды без влияния капиллярных сил (рис. 6). Для режимов, соответствующих значениям a выше границы, капиллярные силы не влияют на стекание воды, при значениях a ниже границы наблюдались режимы как с формированием пробок и перемычек, так и полного стекания воды из канала. Причем чем меньше величина a , тем выше вероятность неполного стекания воды из щелевого канала.

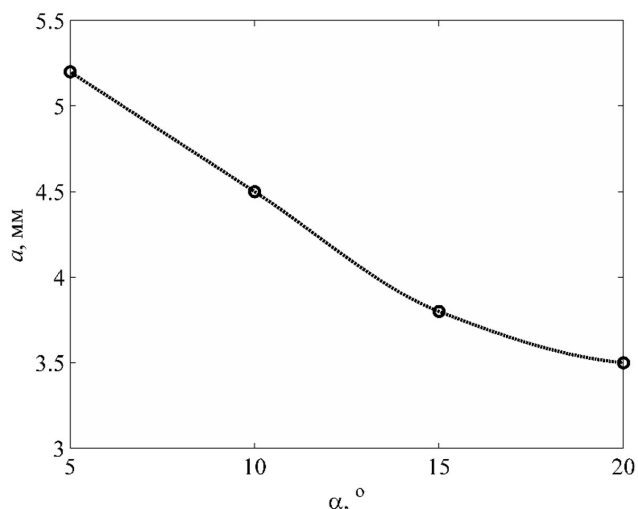


Рис. 6. Граница раздела режимов стекания воды в щелевом канале

Fig. 6. The boundary between the regimes of water runoff in the slot channel

Заклучение

Таким образом, установлены особенности таяния и стекания воды в щелевом канале в зависимости от зазора и угла наклона канала. Влияние капиллярных сил приводит к формированию в щелевом канале следующих водяных структур: полное или частичное перекрытие выходного сечения, локальные перемычки между верхней и нижней сторонами канала, свисающие капли на верхней поверхности, пленка на нижней поверхности у выходного сечения. В ходе экспериментов определена зависимость от угла наклона минимальной величины зазора щелевого канала, обеспечивающей свободное стекание воды без влияния капиллярных сил. Полученная зависимость $a(\alpha)$ дает возможность при заданном угле наклона определять величину межреберного расстояния, исключая влияние капиллярных явлений, и тем самым предотвращать неполное стекание воды в теплообменниках холодильных систем при периодических оттаиваниях.

Список литературы / References

[1] Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2022, 15(1), 24–34 [Vasil'ev E.N., Emel'yanov D.P., Nesterov D. A. Experimental Study of Frost Formation in a Plate Heat Exchanger, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2022, 15(1), 24–34 (In Russian)]

[2] Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения. *Журнал технической физики*, 2021, 91(5), 743–747 [Vasil'ev E. N. Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*, 2021, 66(6), 815–819]

[3] Васильев Е. Н. Регулирование режима охлаждения термоэлектрического блока. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(4), 416–423 [Vasil'ev E. N. Regulation of cooling mode of thermoelectric block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(4), 416–423 (In Russian)]

[4] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика: Гидродинамика*. Т. 6. М.: Наука, 1986. 736 с. [Landau L. D., Lifshits E. M. *Theoretical Physics: Hydrodynamics*, V. 6, Moscow, Nauka., 1986. 736 p. (in Russian)]

[5] Васильев Е. Н., Гейнц Э. Р., Деревянко В. А., Коков Е. Г., Кукушкин С. В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152 [Vasil'ev E. N., Gejnts E. R., Derevyanko V. A., Kokov E. G., Kukushkin S. V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146–152 (In Russian)]