

УДК 532.529: 533.6

¹И.И. Петухов, канд. техн. наук; **²Ю.В. Шахов**, канд. техн. наук; **³В.Н. Сырый**^{1,2,3}Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070e-mail: ¹ilya2950@gmail.com; ²y.v.shakhov@gmail.com; ³syryvn@gmail.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-0645-7912>; ²<http://orcid.org/0000-0003-1228-981X>;³<http://orcid.org/0000-0002-1060-1710>

СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ БЫСТРОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ШУГООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

Для быстрого охлаждения криогенных жидкостей целесообразно использовать струйные охладители жидкости (СОЖ). Охлаждение жидкости производится за счет её частичного испарения при истечении вскипающего потока из сопла с последующим разделением фаз в сепараторе. При давлении на срезе сопла ниже тройной точки можно получить поток в шугообразном состоянии. Рассматривается рабочий процесс в СОЖ, представлены результаты его теоретического и экспериментального исследования. Приведены характеристики СОЖ, работающих на кислороде, водороде, метане и азоте с расходами от 0,2 до 400 кг/с, и установок на их основе. Скорость охлаждения жидкости превышает 400 К/с. Размеры и масса устройств в 30...100 раз меньше, чем у традиционных поверхностных теплообменников. При испытаниях криогенных насосов обеспечено повторное использование до 95 % жидкости. Получен поток шугообразного азота с размерами кристаллов менее 100 мкм. Возможно получение потока шугообразного водорода с полным давлением 0,06...0,18 МПа и размерами кристаллической фазы менее 40 мкм.

Ключевые слова: Криогенные жидкости. Испарительное охлаждение. Струйный охладитель жидкости. Шугообразное состояние.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подавляющее большинство запусков космических аппаратов обеспечиваются ракетами-носителями с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД). Наиболее эффективным и экологически безопасным топливом для них является пара жидкий водород (ЖВ) и жидкий кислород (ЖК) [1, 2]. В качестве криогенного горючего рассматривается также сжиженный природный газ (СПГ).

Общим недостатком криогенных компонентов ракетного топлива является низкая температура кипения при атмосферном давлении. Это вызывает значительные теплопритоки и осложняет охлаждение компонентов в процессе подготовки ракеты-носителя к запуску, а также при стендовых испытаниях агрегатов ЖРД.

Вопросы эффективного охлаждения криогенных жидкостей исследуется в значительном количестве теоретических и экспериментальных работ. Для ракетно-космических систем характерно кратковременное использование криогенных комплексов и высокие расходы компонентов. В связи с этим, а также ввиду малых температурных напоров наибольшее распространение получили теплообменные устройства, обеспечивающие охлаждение криогенных компонентов за счёт их частичного испарения [3–5]. Температурный напор при этом мал и поэтому традиционные

поверхностные теплообменники характеризуются значительными габаритами и массой как собственно конструкции, так и компонента, находящегося в её объёме. Кроме роста стоимости оборудования это увеличивает время захлаживания конструкции и затраты компонента на эти цели.

В значительной мере устранить отмеченные недостатки позволяет струйный охладитель жидкости (СОЖ) [6, 7], в котором испарительное охлаждение реализуется в потоке при истечении вскипающей жидкости из сопла с последующим разделением фаз в сепараторе перед восстановлением статического давления охлажденной жидкости в диффузоре. Развитая поверхность контакта фаз обеспечивает малые габариты устройства, а располагаемая работа пара используется для разгона охлаждаемой жидкости, давление которой на выходе всегда выше давления насыщения [8].

Преимущества струйного охладителя жидкости и эффективное его применение не могут быть реализованы без достоверного описания рабочего процесса и учёта особенностей характеристик СОЖ в составе соответствующих тепло- и массообменных контуров.

2. СХЕМА И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС СТРУЙНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ЖИДКОСТИ

Схема струйного охладителя жидкости с харак-