

УДК 621.565

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ МАЛОТОННАЖНОЙ  
ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОЙ ВРУ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ЖИДКОГО КИСЛОРОДА ОСОБОЙ ЧИСТОТЫ**

**Зайцев А. В.** (Университет ИТМО), **Шерматова Ф. М.** (Университет ИТМО),  
**Наумов Ф. В.** (Университет ИТМО)

**Научный руководитель – доцент, к.т.н. Зайцев А. В.** (Университет ИТМО)

В докладе приведены результаты моделирования высокопроизводительного пластинчато-ребристого трехпоточного теплообменного аппарата, применяемого для максимально охлаждения воздуха перед его детандированием и разделением на компоненты в криогенной воздухоразделительной установке. Высокие требования к термодинамической эффективности работы теплообменника определяются жесткими условиями работы установки: малым расходом потока питающего воздуха и низким рабочим давлением, определяющим величину располагаемой холодопроизводительности. Также произведен расчет других двухпоточных теплообменников установки и конденсатора-испарителя.

**Введение.** После начала третьей волны коронавируса в июне 2021 года было отмечено повышение спроса на производство жидкого кислорода особой чистоты. В результате в 2022 году во многих регионах России стал проявляться дефицит этого продукта. Промышленным предприятиям приходится отказываться от закупки кислорода для своих нужд в пользу больниц, ежедневно закрывающих потребности «ковидных» больных в кислороде. Помимо медицинских целей жидкий кислород особой чистоты применяется и в других областях, в частности в качестве компоненты топлива в ракетных двигателях, при искусственном разведении рыбы и др.

В процессе анализа технологических решений, подходящих для производства жидкого кислорода особой чистоты (далее ЖКО), признаны не подходящими мембранные и адсорбционные установки, поскольку они не соответствуют условиям низкого рабочего давления (порядка 1 МПа) и чистоты продукта (более 99,9 % кислорода). Криогенные воздухоразделительные установки (ВРУ) также обладают серьезными ограничениями. Так малотоннажные установки ЖКО обычно рассчитаны на высокое давление (20 МПа), а ВРУ низкого давления позволяют получать кислород в жидкой форме в количестве примерно 10 % от общего количества газообразного продукта, составляющего 2000 м<sup>3</sup>/ч и более при соответствующих размерах предприятия. Тем не менее, точные расчеты показывают, что при соответствующей компоновке оборудования и тонкой настройке процессов и параметров потоков возможно создание транспортабельной ВРУ низкого давления для получения жидкого кислорода особой чистоты. Одним из важнейших элементов такой установки является основной теплообменник, предназначенный для охлаждения воздушного потока питания за счет большей части холодопроизводительности установки не менее, чем на 100 К.

**Основная часть.** В настоящее время наилучшим конструктивным решением при выборе многопоточного теплообменного аппарата в составе ВРУ считается теплообменник пластинчато-ребристого типа. Одна из методик расчета таких аппаратов заключается в составлении системы дифференциальных уравнений, получаемых из баланса энергии как однофазных, так и двухфазных потоков и уравнений теплопередачи между ними. Коэффициенты теплопередачи рассчитываются по усредненным параметрам потоков и являются константами. Полученная линейная система уравнений решается матричным методом. Авторами предложена методика, основанная на применении локальных коэффициентов теплопередачи и решения нелинейной системы уравнений, полученной в результате разностной аппроксимации, численными методами. Разработан соответствующий алгоритм и компьютерная программа.

В соответствии с технологическим расчетом ВРУ основной теплообменник должен обеспечить охлаждение воздуха в количестве 0,5104 кг/с от температуры 371,1 К до температуры 110,9 К. В качестве встречных холодных потоков используется газообразный воздух (0,005 кг/с) при температуре 90,5 К и парожидкостная смесь азота (0,3857 кг/с) в насыщенном состоянии при температуре 79,77 К. В результате моделирования получены конструктивные характеристики теплообменника: 10 каналов (секций) по каждому потоку, расстояние между пластинами 15 мм, шаг оребрения 2 мм, толщина пластины 1 мм, толщина ребра 0,5 мм. Габаритные размеры пакета 0,200×0,480×0,456 м.

**Выводы.** Разработан и реализован оригинальный метод расчета многопоточных пластинчато-ребристых теплообменников. Проведено моделирование основного теплообменника малотоннажной транспортабельной ВРУ низкого давления для получения жидкого кислорода особой чистоты. Получены расчетные значения конструктивных и режимных параметров основного теплообменного аппарата ВРУ. По предложенной методике также рассчитаны двухпоточные переохладители кубовой жидкости, азотной флегмы и продукционного жидкого кислорода, а также конденсатор-испаритель, устанавливаемый между колоннами высокого и низкого давлений. Представленная методика позволяет производить оптимизационные расчеты теплообменников.

Зайцев А. В.

Подпись \_\_\_\_\_

Шерматова Ф. М.

Подпись \_\_\_\_\_

Наумов Ф. В.

Подпись \_\_\_\_\_