

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЭРОГЕЛЕЙ

**А.В. Шиндряев, А.Е. Лебедев, Н.В. Меньшутина**

Андрей Васильевич Шиндряев (ORCID 0000-0002-3014-190X)\*, Артем Евгеньевич Лебедев (ORCID 0000-0002-6765-7563), Наталья Васильевна Меньшутина (ORCID 0000-0001-7806-1426)

Кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, 20, Москва, Российская Федерация, 125480  
E-mail: andrew95x@gmail.com \*, artem.evg.lebedev@gmail.com, chemcom@muctr.ru

*Проведен анализ технологий получения неорганических аэрогелей на основе диоксида кремния, используемых для производства теплоизоляционных материалов. Приведено описание процесса сверхкритической сушки для получения высокоэффективных теплоизоляционных материалов на основе неорганических аэрогелей, приведены основные технологические параметры. Описана технологическая схема основного этапа получения аэрогелей - процесса сверхкритической сушки. Промышленная установка, в разработке которой принимали участие авторы, находится в ООО «Ниагара», г. Щелково. Для данного производства разработана математическая модель с использованием программного пакета CHEMCAD, позволяющего строить материальный и тепловой балансы как отдельных аппаратов, так и технологической схемы в целом. Технологическая схема процесса сушки в среде сверхкритического диоксида углерода включает следующие аппараты: автоклавы высокого давления (70 л), компрессор, сепаратор, теплообменник, насос хладагента, конденсатор. В статье приведены основные уравнения для расчета параметров работы вышеперечисленного оборудования (мощность, энтальпия, давление и пр.), а также уравнения, используемые при расчете экономических затрат (на сырье, электрическую энергию и пр.). Были проведены расчеты по уравнениям модели, построенной в среде CHEMCAD, и исследовано влияние различных параметров на энерго- и ресурсосбережение процесса. Проведен расчет влияния изопропилового спирта на расход диоксида углерода. Построена зависимость температуры после дросселирования потока сверхкритического диоксида углерода от содержания в нем растворителя (изопропилового спирта), иллюстрирующая возможность снижения количества подводимого тепла на начальных этапах ведения процесса сушки. По полученным данным проведен анализ энергетических и экономических затрат на проведение процесса сверхкритической сушки. На основе математической модели определен энерго- и ресурсоэффективный способ технологического оформления процесса сверхкритической сушки. Установлено уменьшение энергетических и экономических затрат технологической схемы с использованием тепла после компримирования.*

**Ключевые слова:** сверхкритическая сушка, аэрогель, технологическая схема, сверхкритический диоксид углерода, теплоизоляционные материалы

## SIMULATION OF A TECHNOLOGICAL SCHEME IN OBTAINING HEAT-INSULATING MATERIALS ON THE BASIS OF AIROGELS

**A.V. Shindryaev, A.E. Lebedev, N.V. Menshutina**

Andrey V. Shindryaev (ORCID 0000-0002-3014-190X)\*, Artem E. Lebedev (ORCID 0000-0002-6765-7563), Natalya V. Menshutina (ORCID 0000-0001-7806-1426)

Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Geroev Panfilovtsev st., 20, Moscow, 125480, Russia  
E-mail: andrew95x@gmail.com \*, artem.evg.lebedev@gmail.com, chemcom@muctr.ru

*The analysis of technologies for obtaining inorganic aerogels based on silicon dioxide as heat-insulating materials has been carried out. The description of the process of supercritical drying for obtaining highly efficient heat-insulating materials based on inorganic aerogels is given, the main technological parameters are given. The technological scheme of the main stage of obtaining aerogels is presented and described - the process of supercritical drying of an industrial plant located in LLC Niagara, Shchelkovo, in the development of which the authors took part (there is a patent). For this production, a mathematical model has been developed using the CHEMCAD software package, which makes it possible to build material and heat balances of both individual devices and the technological scheme as a whole. The technological scheme of the drying process in the environment of supercritical carbon dioxide includes the following devices: high-pressure autoclaves (70 l), compressor, separator, heat exchanger, refrigerant pump, and condenser. The article presents the basic equations for calculating the operation parameters of the above equipment (power, enthalpy, pressure, etc.), as well as the equations used in calculating economic costs (for raw materials, electricity, etc.). Calculations were carried out according to the equations of the model built in the CHEMCAD environment and the influence of various parameters on the energy and resource saving of the process was studied. The effect of isopropyl alcohol on the consumption of carbon dioxide was calculated. A dependence of the temperature after throttling the flow of supercritical carbon dioxide on the content of the solvent isopropyl alcohol in it is constructed, illustrating the possibility of reducing the amount of heat supplied at the initial stages of the drying process. Based on the data obtained, an analysis of the energy and economic costs of the supercritical drying process was carried out. On the basis of a mathematical model, an energy- and resource-efficient method of technological design of the supercritical drying process is determined. A decrease in the energy and economic costs of the technological scheme using heat after compression has been established.*

**Key words:** supercritical drying, aerogel, technological scheme, supercritical carbon dioxide, heat-insulating materials

**Для цитирования:**

Шиндряев А.В., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В. Моделирование технологической схемы при получении теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 87–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6646.

**For citation:**

Shindryaev A.V., Lebedev A.E., Menshutina N.V. Simulation of a technological scheme in obtaining heat-insulating materials on the basis of airogels. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 12. P. 87–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6646.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире энергосбережение является одной из наиболее приоритетных задач научных исследований и организации производства. Сохранение и экономия энергии – важнейшие процессы энергетической стратегии в поддержании и улучшении стандартов и качества жизни, сокращении загрязнения окружающей среды. В связи с этим теплоизоляционные материалы очень востребованы. В наши дни ведется активный поиск новых материалов для применения их в теплоизоляции. Такие материалы задерживают тепловой поток посредством различных механизмов теплопереноса (теплопроводность, конвекция, излучение) и играют немаловажную роль в снижении количества теплопотерь [1]. Потери тепла зависят от типа и формы теплоизоляционного материала, зависящих от механических, физических, тепловых

свойств и внутренней структуры изоляторов [2]. Потери тепла зависят от механических, физических, тепловых свойств и внутренней структуры теплоизоляционных материалов, а также от формы и размеров теплоизолирующих изделий, изготовленных из этих материалов [3]. Традиционные теплоизоляционные материалы (каменная вата, полистирол, полиуретан и т.д.) имеют коэффициент теплопроводности в диапазоне 0,025–0,04 Вт/(м·К).

Одним из новых высокоэффективных теплоизолирующих материалов являются неорганические аэрогели на основе диоксида кремния. Из-за своей нанопористой структурной природы аэрогели обладают многими уникальными свойствами. Они невоспламеняемы, аморфны, химически инертны и обладают низкой теплопроводностью, вследствие чего находят широкое применение для производства теплоизоляции [4]. Однако некоторые характеристики аэрогелей, такие как открытая

структура, низкая плотность обуславливают их хрупкость и плохие механические свойства, и эти недостатки ограничивают использование чистого аэрогеля из диоксида кремния в качестве теплоизоляционных материалов [5-7]. В связи с этим целесообразно применять композиционные материалы на основе аэрогеля и традиционных теплоизоляторов. В качестве примеров таких композитов можно привести: стекловолокно-аэрогель [8], полиэтилен-терефталат-аэрогель [9], аэрогель-твердый полиизоцианурат [10], аэрогель-полистирол [11], аэрогель-поливиниловый спирт [12]. Коэффициент теплопроводности таких материалов достигает 0,014 Вт/(м·К).

В настоящее время в мире существуют производственные линии по выпуску неорганических аэрогелей в форме монолитов, матов и частиц различной формы. Получаемая продукция используется в качестве теплоизоляционных материалов. Наиболее известными в этой области являются такие корпорации, как Cabot Corporation [13], Aspen Aerogels (США) [14], Nano HiTech (Китай) и EM-Power (Корея) [15].

Самым важным процессом при производстве аэрогелей является сверхкритическая сушка влажных гелей. По мере протекания данного процесса происходит удаление растворителя из пор геля [16, 17]. Сверхкритическая сушка, как и любой вид сушки, является энергозатратным процессом, требующим решения задач оптимизации ресурсо- и энергопотребления. В настоящее время эти задачи решаются с использованием компьютерных пакетов моделирующих программ, которые позволяют значительно упростить разработку технологических схем, что особенно важно при разработке производств на промышленном уровне. Применение различных методов математического моделирования позволяет упростить поиск оптимальных параметров процесса, увеличить его эффективность, значительно снизить затраты на осуществление масштабного перехода при создании промышленного производства. Модернизация существующего оборудования, а также оптимизация режимов работы технологических схем могут обеспечить снижение удельных затрат на сырье, топливо, тепло и электроэнергию [18].

Известно множество исследований, в которых для расчета и оптимизации химико-технологических процессов, происходящих в среде сверхкритических флюидов, использовалось моделирование в различных программных пакетах. Так, с применением моделирования была проведена тех-

нико-экономическая оптимизация процесса разделения водного раствора окиси этилена методом сверхкритической экстракции [19], оптимизация режимов работы установки получения биодизельного топлива [20], оптимизация процесса экстракции кокосового масла с помощью сверхкритического диоксида углерода [21], параметрический анализ и экономическая оптимизация сверхкритического-субкритического органического цикла Ренкина для утилизации отходящего тепла [22].

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СУШКИ

С целью промышленного производства композиционных материалов на основе аэрогеля была разработана установка для проведения процесса сверхкритической сушки, расположенная в ООО «Ниагара», г. Щелково. Она рассчитана на выпуск 8000 м<sup>2</sup>/год высокоэффективных теплоизоляционных материалов в виде рулонов. На сегодняшний день установка введена в эксплуатацию и успешно функционирует. На рис. 1 приведена основная часть технологической схемы, а именно установка для проведения процесса сушки материала.

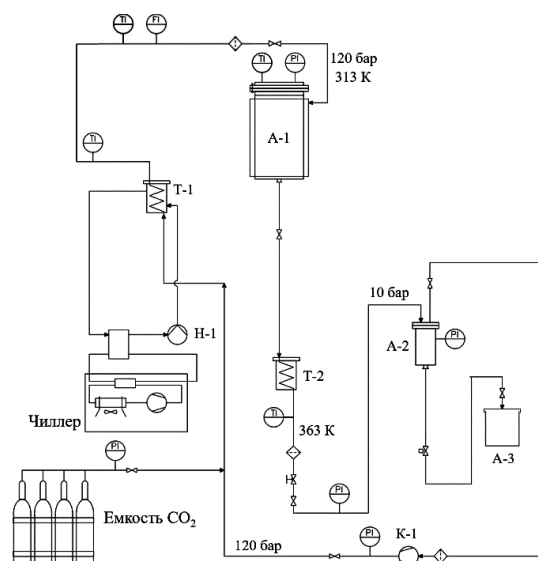


Рис. 1. Технологическая схема промышленной установки по получению высокоэффективных теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей: А-1 – аппарат высокого давления; А-2 – сепаратор; А-3 – емкость для хранения изопропилового спирта; К-1 – компрессор; Н-1 – насос хладагента; Т-1 – конденсатор; Т-2 – теплообменник; PI – датчики давления; TI – датчики температуры; FI – датчик расхода  
Fig. 1. Technological scheme of an industrial plant for the production of highly efficient heat-insulating materials based on aerogels: A-1 – high-pressure apparatus; A-2 – separator; A-3 – isopropyl alcohol storage container; K-1 – compressor; H-1 – refrigerant pump; T-1 – condenser; T-2 – heat exchanger; PI – pressure sensors; TI – temperature sensors; FI – flow sensor

Для процесса сверхкритической сушки задаются следующие параметры: сушильным агентом является сверхкритический диоксид углерода, его расход составляет 150 кг/ч, температура процесса 313 К, давление 120 бар, объем аппарата высокого давления 70 л. Процесс ведется в периодическом режиме работы в автоклаве высокого давления А-1. При указанных параметрах температуры и давления сушильный агент находится в состоянии сверхкритического флюида и неограниченно смешивается с растворителем (изопропиловым спиртом), который необходимо удалить из материала. На выходе из аппарата поток диоксида углерода и растворителя нагревается до 363 К в теплообменнике Т-2. Это необходимо для поддержания заданной температуры после дальнейшего шага – дросселирования потока до давления 10 бар. При таком давлении происходит наиболее эффективное разделение в сепараторе А-2. После разделения поток растворителя поступает в емкость для хранения А-3, а поток диоксида углерода проходит через компрессор К-1, после чего его давление нагнетается до 120 бар, затем происходит охлаждение потока до рабочей температуры 313 К в конденсаторе Т-1 с помощью чиллера. Далее осуществляется возврат потока сушильного агента на рецикл. В качестве холодного теплоносителя при охлаждении потока до рабочей температуры процесса выступает этиленгликоль, который циркулирует в контуре охлаждения. Его расход составляет 6600 кг/ч. При таких условиях происходит процесс сверхкритической сушки в течение 8-12 ч, после чего получают аэрогель с заданными свойствами.

#### РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОЦЕССА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СУШКИ

В данном исследовании при моделировании и расчете технологических схем, подборе параметров работы оборудования использовался программный пакет CHEMCAD. Данный пакет представляет собой инструментальное средство моделирования химико-технологических процессов для решения задач исследования и проектирования химико-технологических систем. Он включает в себя средства статического моделирования основных процессов, основанных на фазовых и химических превращениях, а также средства для расчета геометрических размеров и конструктивных характеристик основных аппаратов, и оценки стоимости оборудования. Программа имеет графический интерфейс.

*Расчетные соотношения и модели.* Уравнения, используемые при расчете потоков и аппаратов в программном пакете CHEMCAD:

Количество передаваемой теплоты при расчете теплообменных аппаратов:

$$Q = KF\Delta t_{cp} \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, Вт;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – движущая сила процесса, К.

Затрачиваемая мощность насоса:

$$P = Q\Delta P/\eta \quad (2)$$

где  $P$  – мощность, Вт;  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $\eta$  – коэффициент полезного действия насоса.

Затрачиваемая мощность компрессора

$$P = \frac{(F \cdot Z \cdot R \cdot \frac{T}{p_{olyc}}) \cdot ((P_{out}/P_{in})^{p_{olyc}} - 1)}{p_{eff}} \quad (3)$$

где  $P$  – мощность, Вт;  $F$  – скорость потока, кмоль/ч;  $Z$  – фактор сжимаемости;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура потока;  $p_{olyc}$  – показатель политропы;  $P_{out}$  – давление на выходе из компрессора, Па;  $P_{in}$  – давление на входе в компрессор, Па;  $p_{eff}$  – коэффициент полезного действия компрессора.

При расчете фазового равновесия в среде сверхкритических флюидов из предложенных моделей была выбрана модель PSRK. Она имеет следующий вид:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad (4)$$

где  $P$  – давление, Па;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $V$  – мольный объем, м<sup>3</sup>/моль.

$$\alpha(T) = a_c \alpha(T) \quad (5)$$

$$a_c = \frac{0,427R^2T_c^2}{p_c} \quad (6)$$

$$b = \frac{0,08664RT_c}{p_c} \quad (7)$$

$$\alpha(T) = \left(1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}}\right)\right)^2 \quad (8)$$

$$m = 0,480 + 1,574\omega - 0,176\omega^2 \quad (9)$$

где  $T_c$  – критическая температура, К;  $p_c$  – критическое давление, Па;  $\omega$  – ацентрический фактор.

Для расчета энтальпии использовалась модель Latent Heat:

$$Q = mL \quad (10)$$

где  $Q$  – количество энергии, выделяемой или поглощаемой при изменении фазы вещества, Дж;  $m$  – масса вещества, кг;  $L$  – удельная теплота вещества (Дж/кг).

*Уравнения, используемые при расчете экономических затрат на процесс сверхкритической сушки по приведенным технологическим схемам.* При оценке экономической эффективности представленных технологических схем учитывались следующие показатели:

1 – производительность  $V$ , выраженная в  $m^2$  мата аэрогеля. Годовая производительность составляет  $8000 m^2/g$  теплоизоляционного материала.

2 – объем капитальных вложений  $\Phi$  в данное производство, исчисляемый в денежных единицах. В качестве капитальных вложений в данном случае выступают затраты на технологическое оборудование.

3 – эксплуатационные затраты  $\Xi$  на осуществление процесса производства, которые измеряются в денежных единицах, затрачиваемых в единицу времени.

Рассмотрим отдельно все составляющие экономических затрат на процесс сверхкритической сушки.

**Затраты на сырье  $S_c$ .** Эта составляющая принимается пропорциональной объему выпускаемой продукции, т.е. производительности процесса  $V$ . В процессе сверхкритической сушки в качестве данного вида затрат выступают затраты на углекислый газ, который является сушильным агентом. Затраты на сырье определяются следующим выражением:

$$S_c = \frac{s_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}{V} \quad (11)$$

где  $s_{CO_2}$  – затраты на 1 л углекислого газа, учитывающие стоимость и доставку, руб;  $V_{CO_2}$  – объем углекислого газа, затрачиваемый за рабочую смену, л.

**Переменные расходы  $S_T$ .** Эта часть стоимости производства продукта включает стоимость электрической энергии и принимается пропорциональной производительности процесса:

$$S_T = \frac{P \cdot t \cdot s_3}{V} \quad (12)$$

где  $P$  – Электрическая мощность, необходимая на осуществление процесса сверхкритической сушки, кВт;  $t$  – время рабочей смены, равное 12 ч;  $s_3$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

**Постоянные расходы  $S_{\Pi}$ .** Эта часть расходов не зависит от объема выпускаемой продукции  $V$  и обуславливается объемом капитальных вложений  $\Phi$  в основные фонды производства. Составляющей данного типа расходов является амортизационные отчисления  $S_a$ . В данном расчете принимается, что амортизационные отчисления составляют 10% от капитальных вложений  $\Phi$

$$S_{\Pi} = S_a = 0,1 \Phi \quad (13)$$

Общее выражение для экономических затрат, необходимых на осуществление процесса сверхкритической сушки по каждой из приведенных технологических схем:

$$S_{\Sigma} = S_c + S_T + S_{\Pi} \quad (14)$$

**Расчет технологической схемы сверхкритической сушки.** На начальном этапе моделирования создается новый файл технологической схемы, далее выбираются технические размерности и компоненты, участвующие в технологическом процессе. Далее происходит выбор термодинамических моделей и построение технологической схемы. Следующим этапом является задание параметров оборудования и входных потоков, после чего происходит запуск программы моделирования. Заключительной стадией является вывод на экран и просмотр результатов моделирования. Технологическая схема сверхкритической сушки с рекуперацией при получении композиционных материалов на основе аэрогеля, составленная из отдельных элементов, соединенных потоками, приведена на рис. 2.

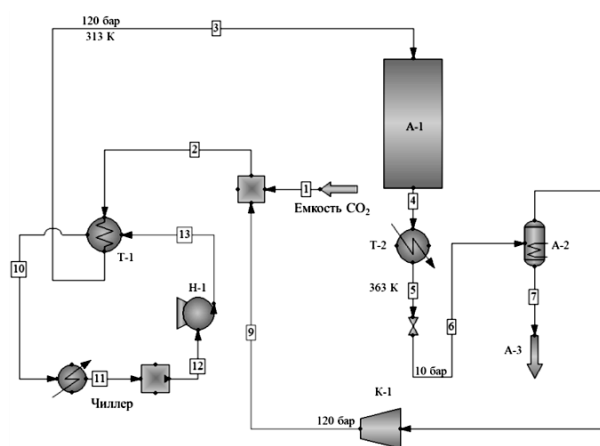


Рис. 2. Технологическая схема установки сверхкритической сушки: 1-13 – потоки; А-1 – аппарат высокого давления; А-2 – сепаратор; А-3 – емкость для хранения изопропилового спирта; К-1 – компрессор; Н-1 – насос хладагента; Т-1 – конденсатор; Т-2 – теплообменник

Fig. 2. Technological scheme of plant for the supercritical drying with recycle: 1-13 - streams; А-1 - high-pressure apparatus; А-2 - separator; А-3 - isopropyl alcohol storage container; К-1 - compressor; Н-1 - refrigerant pump; Т-1 - condenser; Т-2 - heat exchanger

Данная технологическая схема, построенная в среде CHEMCAD, соответствует схеме промышленной установки для сверхкритической сушки, приведенной на рис. 1. Моделирование схемы происходит с использованием стандартных соотношений и моделей, заложенных в программный пакет. Так как расчет производится в квазистационарном режиме, то на начальном этапе моделируются потоки сверхкритического диоксида углерода без учета изопропилового спирта, который удаляется из высушиваемого материала и поступает на выход из автоклава высокого давления. Результатом моделирования являются рассчитанные

значения потоков технологической схемы и характеристики единиц оборудования. По полученным данным рассчитываются энергозатраты, необходимые для осуществления процесса, а также экономические затраты на процесс сушки при применении данной технологической схемы., что будет представлено в следующем разделе.

*Исследование влияния различных параметров на возможность энергосбережения процесса. Расчет влияния изопропилового спирта на поток диоксида углерода.* Как было сказано ранее, на начальных этапах расчета проводилось моделирование без учета изопропилового спирта, который присутствует в потоке, выходящем из автоклава высокого давления. Так как моделирование производится в квазистационарном режиме, то для учета влияния спирта необходимо провести серию расчетов с разным его содержанием в потоке.

С целью имитации изменения содержания изопропилового спирта внутри аппарата А-1 в исходную технологическую схему непосредственно перед поступлением в автоклав внесена емкость с изопропиловым спиртом. Содержание спирта в потоке варьируется в пределах от 0 до 80% масс. Для оценки влияния добавленного спирта на параметры процесса рассматривается изменение температуры потока после дросселирования до 10 бар. Результаты приведены в соответствующем разделе.

*Расчет модернизированной технологической схемы с использованием тепла после компримирования.* При прохождении потока диоксида углерода через компрессор К-1 его давление резко увеличивается с 10 до 120 бар. Компримирование газа сопровождается повышением его температуры и требует последующего охлаждения. Такой поток обладает большим количеством тепла, которое может быть использовано в целях повышения энергоэффективности технологической схемы процесса. На рис. 3 приведена технологическая схема, в которой часть тепла потока после компримирования диоксида углерода расходуется на предварительный подогрев смеси, выходящей из аппарата высокого давления А-1.

При применении данной схемы возможно снижение энергетических затрат на обогрев потока 4 перед дросселированием. Так как часть энергии затрачивается на обогрев потока 4, то на выходе из теплообменника Т-2 поток 11 имеет меньшую температуру по сравнению с потоком 9 в исходной схеме на рис. 2, который впоследствии необходимо

охлаждать. Следовательно, для его охлаждения необходим чиллер с меньшей холодопроизводительностью, что также уменьшает затраты энергии. Таким образом, возможно снижение энергозатрат на нагрев потока 4 и на охлаждение потока 10.

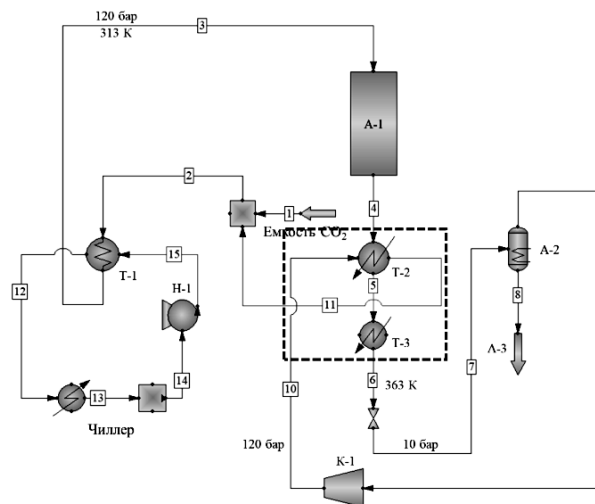


Рис. 3. Модернизированная технологическая схема установки сверхкритической сушки с использованием тепла после компримирования

Fig 3. Modified technological scheme of supercritical drying plant using heat after compression

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По окончании моделирования исходной технологической схемы, приведенной на рис. 2, получены значения характеристик входных и выходных потоков, а также характеристики единиц оборудования. Результаты представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Характеристики потоков технологической схемы  
Table 1. Flow characteristics of technological scheme

Поток		Т, К	Р, бар	v, кг/ч
1	Линия CO <sub>2</sub>	298	40	150
2		507	120	150
3		313	120	150
4		313	120	150
5		363	120	150
6		263	10	150
7		263	10	150
8		263	10	150
9		507	120	150
10		Линия теплоносителя	276	3,5
11	276		3,5	6600
12	276		1	6600
13	279		3,5	6600

**Таблица 2**  
**Характеристики оборудования технологической**  
**схемы**  
**Table 2. Equipment characteristics of technological**  
**scheme**

Порядковый номер на схеме	Наименование	Характеристика
T-1	Конденсатор	Поток тепла 14,41 кВт
T-2	Теплообменник	Поток тепла 6,81 кВт
K-1	Компрессор	Мощность 4,02 кВт
-	Чиллер	Холодопроизводительность 14,80 кВт
H-1	Насос хладагента	Мощность 0,85 кВт

В табл. 3 сведены значения температуры после дросселирования  $T_d$ , необходимые для оценки влияния изопропилового спирта на параметры процесса сверхкритической сушки, которые получены по результатам моделирования технологической схемы на рис. 3.

**Таблица 3**  
**Результаты расчета влияния изопропилового**  
**спирта**  
**Table 3. Results of calculating the effect of isopropyl**  
**alcohol**

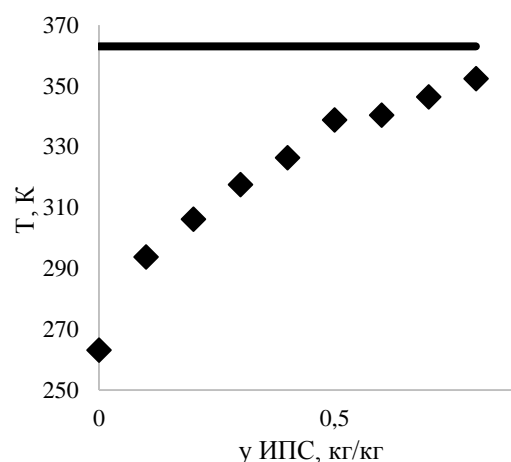
у ИПС, кг/кг	Расход CO <sub>2</sub> , кг/ч	Расход ИПС, кг/ч	$T_d$ , К
0	150	0	263,13
0,1	135	15	293,78
0,2	120	30	306,22
0,3	105	45	317,56
0,4	90	60	326,40
0,5	75	75	338,82
0,6	60	90	340,38
0,7	45	105	346,47
0,8	30	120	352,40

По результатам серии расчетов, представленным в таблице, построен график зависимости температуры после дросселирования  $T_d$  от содержания изопропилового спирта в потоке у ИПС, изображенный на рис. 4.

Из графика видно, что температура после дросселирования увеличивается с ростом массовой доли спирта. При отсутствии спирта разность температур составляет 100 К, а при приближении к 80% масс. спирта это число уменьшается до 10 К. Из чего можно сделать вывод, что на начальных

этапах сушки, когда содержание спирта максимальное, на обогрев смеси перед дросселированием можно заметно снизить количество подводимого тепла.

В табл. 4 приведено сравнение энергетических затрат на осуществление процесса сверхкритической сушки, рассчитанных по результатам моделирования исходной технологической схемы (рис. 2) и модернизированной схемы с использованием тепла после компримирования (рис. 3). Проводится сравнение затрачиваемой мощности по каждой единице оборудования технологических схем.



**Рис. 4.** Зависимость температуры после дросселирования от содержания в потоке изопропилового спирта: — до дросселирования, □ после дросселирования  
**Fig. 4.** Dependence of the temperature after throttling on the content of isopropyl alcohol in the flow: — before throttling, □ after throttling

**Таблица 4**  
**Результаты расчета энергетических затрат**  
**Table 4. Energy costs calculation results**

Наименование оборудования	Затрачиваемая мощность, кВт	
	Исходная схема	Схема с использованием тепла после компримирования
Насос H-1	0,847	0,847
Компрессор K-1	4,016	4,016
Теплообменник T-2	6,809	-
Теплообменник T-3	-	3,511
Чиллер	7,400	6,090
Всего	19,072	14,464

Исходя из полученных данных следует вывод о том, что эффективное использование тепла после компримирования очень выгодно сказывается на ведении процесса сверхкритической сушки. Показано снижение энергетических затрат на осуществление процесса более чем на 24%. Такой ре-

зультат дает возможность применять данную модернизированную схему, либо комбинировать представленное технологическое решение с другими, повышающими эффективность ведения процесса.

Эффективность модернизированной технологической схемы подтверждена экономическими затратами двух схем. Значения экономических затрат, полученных по результатам моделирования, сведены в табл. 5.

Таблица 5

Экономические затраты технологических схем  
Table 5. Economic costs of technological schemes

Вид экономических затрат	Затраты на исходную технологическую схему, руб/м <sup>2</sup>	Затраты на технологическую схему с использованием тепла после компримирования, руб/м <sup>2</sup>
Затраты на сырье $S_c$	138,06	138,06
Переменные расходы $S_t$	88,54	59,20
Постоянные расходы $S_p$	41,29	42,55
Суммарные затраты $S_\Sigma$	267,89	239,81

Применение схемы с использованием тепла после компримирования демонстрирует снижение суммарных экономических затрат, необходимых на осуществление процесса по приведенным технологическим схемам. Это связано с уменьшением энергетических затрат на процесс сверхкритической сушки. Дополнительный теплообменник Т-3, включенный в схему, вносит небольшой вклад в

общие затраты, поэтому его установка является полностью оправданной. Уменьшение экономических затрат по сравнению с исходной технологической схемой составило 10,48%.

## ВЫВОДЫ

В рамках данного исследования с применением программного пакета CHEMCAD была разработана модель процесса сверхкритической сушки с рекуперацией диоксида углерода. Построена и рассчитана технологическая схема процесса. Проведен анализ влияния растворителя изопропилового спирта на ход процесса. Выявлено, что на начальных этапах сушки на обогрев смеси перед дросселированием можно заметно снизить количество подводимого тепла. Предложен вариант оптимизации технологической схемы. Рассчитаны энергетические и экономические затраты исходной и оптимизированной технологических схем. Установлено, что уменьшение экономических затрат составляет 10,48%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, FSSM–2020–0003.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, FSSM-2020-0003.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Mohammad S. Al-Homoud.** Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Build. Environ.* 2012. V. 40 (3). P. 353–366. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
2. **Abdou A., Budaiwi I.** The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construct. Build. Mater.* 2013. V. 43. P. 533–534. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058.
3. **Bahadori Alireza.** Thermal Insulation Handbook for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries. Lismore, NSW, Australia: School of Environment, Science & Engineering, Southern Cross University. 2015. 416 с.
4. **Mulder C.A.M., Van Lierop J.G.** Aerogels. Berlin: Springer. 1986. 68 p. DOI: 10.1007/978-3-642-93313-4\_8.
5. **Hajar Maleki, Luisa Durães, António Portugal.** An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *J. Non-Cryst. Solids.* 2014. 385. P. 55–74. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017.
6. **Hailong Yang, Xiangming Kong, Yanrong Zhang, Chunchao Wu, Enxiang Cao.** Mechanical properties of polymer-modified silica aerogels dried under ambient pressure. *J. Non-Cryst. Solids.* 2014. 357 (19). P. 3447–3453. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.06.017.

## REFERENCES

1. **Mohammad S. Al-Homoud.** Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Build. Environ.* 2012. V. 40 (3). P. 353–366. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
2. **Abdou A., Budaiwi I.** The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construct. Build. Mater.* 2013. V. 43. P. 533–534. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058.
3. **Bahadori Alireza.** Thermal Insulation Handbook for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries. Lismore, NSW, Australia: School of Environment, Science & Engineering, Southern Cross University. 2015. 416 p.
4. **Mulder C.A.M., Van Lierop J.G.** Aerogels. Berlin: Springer. 1986. 68 p. DOI: 10.1007/978-3-642-93313-4\_8.
5. **Hajar Maleki, Luisa Durães, António Portugal.** An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *J. Non-Cryst. Solids.* 2014. 385. P. 55–74. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017.
6. **Hailong Yang, Xiangming Kong, Yanrong Zhang, Chunchao Wu, Enxiang Cao.** Mechanical properties of polymer-modified silica aerogels dried under ambient pressure. *J. Non-Cryst. Solids.* 2014. 357 (19). P. 3447–3453. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.06.017.



7. **Dylan J. Boday, Beatrice Muriithi, Robert J. Stover, Douglas A. Loy.** Polyaniline nanofiber–silica composite aerogels. *J. Non-Cryst. Solids*. 2012. 358 (12). P. 1575–1580. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2012.04.020.
8. **Bo Yuan, Shuqiang Ding, Dongdong Wang, Gang Wang, Hongxia Li.** Heat insulation properties of silica aerogel/glass fiber composites fabricated by press forming. *Mater. Lett.* 2012. 75. P. 204–206. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.01.114.
9. **Kyung Wha Oh, Duk Ki Kim, Seong Hun Kim.** Ultra-porous flexible PET/Aerogel blanket for sound absorption and thermal insulation. *Fibers Polym.* 2018. 10 (5). P. 731–737. DOI: 10.1007/s12221-010-0731-3.
10. **René Pirard, Arnaud Rigacci, J.C. Marechal, D. Quenard, Br Chevalier, Patrick Achard, Jean-Paul Pirard.** Characterization of hyperporous polyurethane-based gels by noninvasive mercury porosimetry. *Polymer*. 2003. 44 (17). P. 4881–4887. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00481-6.
11. **Gangqiang Geng, Suqing Wen, Huan Wang.** Study on dispersion polymerization process of silica aerogel/polystyrene core-shell composite particles. *Res. Mater. Sci.* 2013. 2 (2). P. 16–22.
12. **Hyung Min Kim, Ye Ji Noh, Jaesang Yu, Seong Yun Kim, Jae Ryoum Youn.** Silica aerogel/polyvinyl alcohol (PVA) insulation composites with preserved aerogel. *Compos. Pt. A: Appl. Sci. Manufact.* 2015. V. 75. P. 39–45. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.04.014.
13. Cabot Corporation [Электронный ресурс] // Cabot Corporation. URL: <http://www.cabotcorp.com/> (дата обращения: 07.03.2021).
14. Aspen Aerogels Industrial Aerogel Insulation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aerogel.com/> (дата обращения: 07.03.2021).
15. **Koebel M., Rigacci A., Achard P.** Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *J Sol-Gel Sci Technol.* 2012. V. 63 (3). P. 315–339. DOI: 10.1007/s10971-012-2792-9.
16. **Akimov Y.K.** Fields of application of aerogels (Review). *Instrum. Experim. Techn.* 2003. V. 46. N 3. P. 287–299. DOI: 10.1023/A:1024401803057.
17. **Dorcheh A.S., Abbasi M.H.** Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *J. Mater. Proc. Technol.* 2016 V. 199. N 1–3. P. 10–26. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
18. **Караневская Т.Н., Шумихин А.Г.** Моделирование технологических процессов в целях алгоритмизации задачи управления объектами промышленной подготовки нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 84–90. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
19. **Гумерова Г.И., Нуретдинов Р.Р., Режевски П., Копитовски Е., Гумеров Ф.М.** Технико-экономическая оптимизация процесса разделения водного раствора окиси этилена методом сверхкритической экстракции. *Vestn. Kazan. tekhnol. un-ta*. 2003. № 2. С. 391–397.
20. **Рыжов Д.А., Шакирова А.М., Кошкина Л.Ю.** Оптимизация режимов работы установки получения биодизельного топлива в ChemCad. *Vestn. Kazan. tekhnol. un-ta*. 2016. № 18. С. 160–163.
21. **Torres-Ramón E., García-Rodríguez C.M., Estévez-Sánchez K.H., Ruiz-López I.I., Rodríguez-Jimenes G.C., Romero de la Vega G., García-Alvarado M.A.** Optimization of a coconut oil extraction process with supercritical CO<sub>2</sub> considering economical and thermal variables. *J. Supercrit. Fluids*. 2021. V. 170. P. 105160. DOI: 10.1016/j.supflu.2020.105160.
22. **Yong-qiang Feng, Wei Zhang, Hassan Niaz, Zhi-xia He, Shuang Wang, Xin Wang, Yu-zhuang Liu.** Parametric analysis and thermo-economical optimization of a Supercritical-Subcritical organic Rankine cycle for waste heat utilization. *Energy Conversion Management*. 2021. V. 212. P. 112773. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112773.
7. **Dylan J. Boday, Beatrice Muriithi, Robert J. Stover, Douglas A. Loy.** Polyaniline nanofiber–silica composite aerogels. *J. Non-Cryst. Solids*. 2012. 358 (12). P. 1575–1580. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2012.04.020.
8. **Bo Yuan, Shuqiang Ding, Dongdong Wang, Gang Wang, Hongxia Li.** Heat insulation properties of silica aerogel/glass fiber composites fabricated by press forming. *Mater. Lett.* 2012. 75. P. 204–206. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.01.114.
9. **Kyung Wha Oh, Duk Ki Kim, Seong Hun Kim.** Ultra-porous flexible PET/Aerogel blanket for sound absorption and thermal insulation. *Fibers Polym.* 2018. 10 (5). P. 731–737. DOI: 10.1007/s12221-010-0731-3.
10. **René Pirard, Arnaud Rigacci, J.C. Marechal, D. Quenard, Br Chevalier, Patrick Achard, Jean-Paul Pirard.** Characterization of hyperporous polyurethane-based gels by noninvasive mercury porosimetry. *Polymer*. 2003. 44 (17). P. 4881–4887. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00481-6.
11. **Gangqiang Geng, Suqing Wen, Huan Wang.** Study on dispersion polymerization process of silica aerogel/polystyrene core-shell composite particles. *Res. Mater. Sci.* 2013. 2 (2). P. 16–22.
12. **Hyung Min Kim, Ye Ji Noh, Jaesang Yu, Seong Yun Kim, Jae Ryoum Youn.** Silica aerogel/polyvinyl alcohol (PVA) insulation composites with preserved aerogel. *Compos. Pt. A: Appl. Sci. Manufact.* 2015. V. 75. P. 39–45. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.04.014.
13. Cabot Corporation [Электронный ресурс] // Cabot Corporation. URL: <http://www.cabotcorp.com/> (дата обращения: 07.03.2021).
14. Aspen Aerogels Industrial Aerogel Insulation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aerogel.com/> (дата обращения: 07.03.2021).
15. **Koebel M., Rigacci A., Achard P.** Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *J Sol-Gel Sci Technol.* 2012. V. 63 (3). P. 315–339. DOI: 10.1007/s10971-012-2792-9.
16. **Akimov Y.K.** Fields of application of aerogels (Review). *Instrum. Experim. Techn.* 2003. V. 46. N 3. P. 287–299. DOI: 10.1023/A:1024401803057.
17. **Dorcheh A.S., Abbasi M.H.** Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *J. Mater. Proc. Technol.* 2016 V. 199. N 1–3. P. 10–26. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
18. **Karanevskaya T.N., Shumikhin A.G.** Modeling of technological processes for algorithmization of problem of management of oil field treatment facilities. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 2. P. 84–90 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
19. **Gumerova G.I., Nuretdinov R.R., Rezhnevsky P., Kopitovskiy E., Gumerov F.M.** Technical and economic optimization of the process of separation of an aqueous solution of ethylene oxide by supercritical extraction. *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2003. V. 2. P. 391–397 (in Russian).
20. **Ryzhov D.A., Shakirova A.M., Koshkina L.Yu.** Optimization of operating modes of a biodiesel fuel production unit in ChemCad. *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2016. V. 18. P. 160–163.
21. **Torres-Ramón E., García-Rodríguez C.M., Estévez-Sánchez K.H., Ruiz-López I.I., Rodríguez-Jimenes G.C., Romero de la Vega G., García-Alvarado M.A.** Optimization of a coconut oil extraction process with supercritical CO<sub>2</sub> considering economical and thermal variables. *J. Supercrit. Fluids*. 2021. V. 170. P. 105160. DOI: 10.1016/j.supflu.2020.105160.
22. **Yong-qiang Feng, Wei Zhang, Hassan Niaz, Zhi-xia He, Shuang Wang, Xin Wang, Yu-zhuang Liu.** Parametric analysis and thermo-economical optimization of a Supercritical-Subcritical organic Rankine cycle for waste heat utilization. *Energy Conversion Management*. 2021. V. 212. P. 112773. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112773.

Поступила в редакцию (Received) 19.04.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 05.09.2022