

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF105246>

Анализ продолжительности низкотемпературной циркуляционной заправки адсорбционной системы аккумулирования метана при помощи программного пакета ANSYS Fluent

И.Д. Шелякин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Системы адсорбированного природного газа являются перспективной альтернативой сжиженному природному газу высоких давлений и сжиженному природному газу низких температур. Системы адсорбированного природного газа позволяют аккумулировать метан при меньших энергозатратах и с повышенной пожаровзрывобезопасностью вследствие «связанного» состояния газа в порах. Однако процесс заправки осложняется тепловыми эффектами адсорбции, снижающими энергетическую эффективность метода и требующими дополнительного терморегулирования. Проведено исследование продолжительности низкотемпературной циркуляционной заправки элементарной адсорбционной ячейки различных геометрий при разных режимах по температуре и давлению. Критерием окончания заправки выбрано достижение количества аккумулированного метана в 95% от предельного значения, постоянного для всех рассматриваемых случаев. В результате моделирования отмечено сокращение продолжительности аккумулирования газа при повышении рабочего давления. Установлено, что на длительность заправки значительное влияние оказывает диаметр отверстия газового канала, необходимого для снижения гидравлического сопротивления слоя адсорбента: с увеличением диаметра канала с 4 до 6 мм продолжительность заправки в среднем уменьшилась на 138 с, или на 25%. Вдвое меньший эффект, около 13%, наблюдался при увеличении диаметра с 2 до 4 мм, что обусловлено изменением характера охлаждения.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, пористая среда, адсорбция, адсорбент, метан, процессы тепло- и массообмена, хранение метана, метод конечных элементов, циркуляционная заправка

Как цитировать:

Шелякин И.Д. Анализ продолжительности низкотемпературной циркуляционной заправки адсорбционной системы аккумулирования метана при помощи программного пакета ANSYS Fluent // *Холодильная техника*. 2022. Т. 111. № 1. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF105246>

DOI <https://doi.org/10.17816/RF105246>

Analysis of the duration of the low-temperature circulation charging of an adsorption methane storage system using the ANSYS Fluent software package

Igor D. Shelyakin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Adsorbed natural gas (ANG) systems are a promising alternative to the high-pressure compressed natural gas and low-temperature liquefied natural gas. ANG systems accumulate methane with lower energy consumption and an increased fire and explosion safety due to the gas-bound state in the pores. However, the charging process is complicated due to the thermal effects of adsorption, which reduce the method's energy efficiency, thus needing an additional thermal control. A study of the duration of low-temperature circulation charging of an elementary adsorption cell of various geometries was conducted under different temperature and pressure modes. The charging completion criterion was achieving 95% limit value of the amount of accumulated methane, which was constant for all considered cases. As a result of modeling, a reduction in the duration of gas accumulation was observed with an increase in the operating pressure. It has been established that the charging time is significantly affected by the gas channel opening diameter, required to reduce the hydraulic resistance of the adsorbent layer as when the channel diameter increased from 4 to 6 mm, the charging time decreased by 138 s or 25% on an average. A twofold smaller effect of ~13% was registered with an increase in the diameter from 2 to 4 mm due to the changing cooling nature.

Keywords: mathematical modeling; computational fluid dynamics; porous medium; adsorption; adsorbent; methane; heat and mass transfer; methane storage; finite element method, circulation charging

To cite this article:

Shelyakin ID. Analysis of the duration of low-temperature circulating charging of an adsorption methane storage system using the ANSYS Fluent software package. *Refrigeration Technology*. 2022;111(1):21–28. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF105246>

Received: 19.03.2022

Accepted: 11.06.2022

Published: 24.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Технология адсорбированного природного газа (АПГ) является одним из наиболее актуальных направлений развития систем хранения газа, в частности за счет высокой энергоэффективности [1], отсутствия экстремально высоких давлений и криогенных температур, а также повышенной пожаровзрывобезопасности [2]. Однако из-за значительных тепловых эффектов процессов адсорбции и десорбции, приводящих к существенному изменению температуры адсорбента и влияющих на эффективность всей системы, требуется разработка новых подходов к организации процессов заправки и выдачи в системах АПГ и их терморегулированию. Как правило, для снижения влияния тепловых эффектов могут быть использованы специальные системы терморегулирования: теплообменники, установленные внутри [3–5] или снаружи [3, 6–8] адсорбера–аккумулятора АПГ, а также циркуляционные контуры рабочего газа [9–11] с охлаждением/нагревом во внешнем теплообменнике [10–13]. Поскольку в случае циркуляционной системы АПГ агентом, снимающим теплоту адсорбции, может являться сам поглощаемый адсорбентом природный газ (ПГ), возникает вопрос о конструктивном исполнении и структуре адсорбционного слоя.

Применение низкотемпературной циркуляционной заправки особенно актуально при использовании моноблочного адсорбента с системой проточных каналов для снижения гидравлического сопротивления адсорбционного слоя [9, 10]. Подобное решение позволяет одновременно увеличить количество аккумулируемого вещества за счет высокой плотности моноблоков и сохранить достаточный расход газового потока. Согласно [10, 11] понижение температуры подаваемого газа позволяет значительно улучшить пожаровзрывобезопасные характеристики заправочной системы, но может привести к замедлению процесса заправки [10, 11].

Математическое моделирование является одним из основных методов исследования процессов тепломассопереноса, происходящих при заправке и выдаче ПГ из адсорбера–аккумулятора. Чаще всего рассматривают одномерные [7, 8, 11] и двумерные [4, 6, 9, 12, 13] математические модели с учетом осесимметричной конструкции адсорберов. Модели с сосредоточенными параметрами [3, 14] и трехмерные модели [5] встречаются сравнительно редко. Помимо «конвективных» моделей [4–6], рассматриваются также математические модели «эквивалентной теплопроводности» [7, 8]. В работе [15] сравниваются результаты расчета процессов тепломассопереноса при заправке адсорбера объемом 150 мл по одномерной, двумерной и трехмерной моделям и делаются выводы об адекватности использования математических моделей различной сложности. Для задач моделирования терморегулируемых систем

хранения АПГ авторы данной работы рекомендуют использовать двумерные и трехмерные модели. Одномерные модели рекомендуются только для предварительных расчетов.

Относительно часто встречаются статьи по моделированию процесса адсорбции непосредственно в среде ANSYS Fluent. В ряде работ Л.Л. Васильева, Л.Е. Канончика и др. [4, 12] приводятся различные исследования на тему хранения и терморегулирования АПГ. Моделирование адсорбции в упомянутых исследованиях осуществляется при помощи теории объемного заполнения микропор с учетом теплового эффекта адсорбции в виде изостерической теплоты адсорбции при дополнительном влиянии теплоемкой массы адсорбата. Наиболее распространенным упрощением в таких моделях является пренебрежение ограниченностью интенсивности теплообмена [4, 5, 7, 8, 14], что оправдано из-за высокоразвитой поверхности адсорбента.

Математическая модель, используемая в данном исследовании подобна двумерным моделям в [4, 12], однако учитывает особенности трехмерной геометрии, а также свойства реального газа и использует при расчете гладкие аппроксимационные функции экспериментальных данных по адсорбции $\alpha(p, T)$ и удельной энтальпии адсорбата $h_{ab}(a, T)$. При помощи данной математической модели в рамках теоретического исследования проводится анализ продолжительности низкотемпературной циркуляционной заправки методом математического моделирования в ANSYS Fluent при различных режимах по температуре и давлению, а также геометрических параметрах элементарной ячейки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При использовании моноблочного адсорбента с проточными каналами, расположенными в шахматном порядке [11], можно выделить ячейку в форме шестиугольной призмы, включающую только одно отверстие, что может существенно сократить время расчетов. Поскольку шестиугольная призма симметрична, достаточно рассмотреть 1/6 часть ячейки, «вырезанной» из моноблока адсорбента (рис. 1).

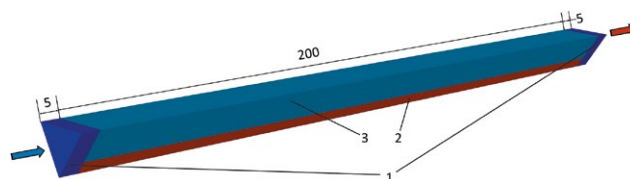


Рис. 1. Геометрия расчетной области: 1 – торцевые области газовой фазы метана; 2 – зона газовой фазы метана в проточной части; 3 – область адсорбента.

Fig. 1. Geometry of the computational domain: 1—end regions of methane gas phase; 2—methane gas phase zone in the flow part; 3—the adsorbent region.



Рис. 2. Структурированная сетка расчетной области.

Fig. 2. Structural grid of the computational domain.

Структурированная сетка расчетной области, состоящая из 562 380 элементов, изображена на рис. 2.

Выбранный масштаб расчетной сетки обеспечивает точность определения продолжительности заправки с погрешностью не более 1 с, что является достаточным для рассматриваемых временных интервалов. Отметим, что дальнейшее сокращение расчетной области до 1/12 от изначальной ячейки нецелесообразно, так как приводит к трудностям при создании структурированной сетки высокого качества и компактности.

Для учета течения части общего потока через торцевую поверхность зоны адсорбента область 3 газовой фазы метана представляет собой проточную часть в сегменте центрального отверстия 2 и два торцевых участка 1 до и после ячейки (рис. 1). Длина участка адсорбента в 200 мм была взята для уменьшения граничных эффектов около торцов и установления стабильного продольного потока газа по слою адсорбента.

В зоне свободного газового пространства 1, 2 решается система из трех уравнений переноса в частных производных: неразрывности (1), импульса (2) и энергии (3):

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho) + \nabla(\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}_{eff}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})), \quad (3)$$

где τ – время; ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости потока осредненной по Фавру; p – давление; $\bar{\tau}_{eff}$ – эффективный тензор вязких напряжений, учитывающий влияние турбулентных пульсаций; E – полная удельная энергия; λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий улучшение теплообмена в потоке газа за счет более интенсивного турбулентного перемешивания; T – абсолютная температура.

В зоне однородно упакованного адсорбента 3, моделируемого как пористая среда, решается система из трех уравнений переноса в частных производных (4)–(6), которая аналогична уравнениям (1)–(3),

но также дополнительно учитывает наличие твердой фазы и адсорбционные эффекты:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\gamma \rho) + \nabla(\gamma \rho \vec{v}) = S_M, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\gamma \rho \vec{v}) + \nabla(\gamma \rho \vec{v} \vec{v}) = \\ = -\gamma \nabla p + \nabla(\gamma \bar{\tau}) - \left(\frac{\gamma^2 \mu}{\alpha} \vec{v} + \frac{\gamma^3 C_2}{2} \rho |\vec{v}| \vec{v} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\gamma \rho_g E_g + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla(\vec{v}(\rho_g E_g + p)) = \\ = \nabla(\lambda_{gs} \nabla T + (\bar{\tau} \vec{v})) + S_H, \end{aligned} \quad (6)$$

где γ – порозность; \vec{v} – вектор скорости потока; S_M – объемный сток массы в результате адсорбции; $\bar{\tau}$ – тензор вязких напряжений; μ – вязкость; α – проницаемость среды; C_2 – коэффициент инерционных потерь; ρ_g – плотность газовой фазы; E_g – полная удельная энергия газовой фазы; ρ_s – кажущаяся плотность адсорбента вместе с микропорами; E_s – полная энергия адсорбента; λ_{gs} – приведенная теплопроводность системы «адсорбент–адсорбат»; S_H – объемный источник/сток энергии в результате адсорбции.

В окрестностях температуры 273,15 К удельная теплоемкость адсорбента C_s , Дж/(кг×К), с учетом связующего упрощенно задается линейной функцией от температуры T , К (7):

$$C_s = 816,3 + 2,68(T - 273,15). \quad (7)$$

Приведенная теплопроводность в уравнении (6) определяется по формуле (8):

$$\lambda_{gs} = \gamma \lambda_g + (1 - \gamma) \lambda_s, \quad (8)$$

где λ_g – теплопроводность газовой фазы; λ_s – теплопроводность слоя адсорбента.

Теплопроводность слоя адсорбента λ_s , Вт/(м×К) в окрестностях температуры 273,15 К задана упрощенной линейной зависимостью от температуры T по формуле (9):

$$\lambda_s = 0,445 - 0,000384T. \quad (9)$$

Сток массы определяется скоростью процесса адсорбции и задается уравнением (10):

$$S_M = \frac{\partial a}{\partial \tau} M \rho_{bulk}, \quad (10)$$

где a – адсорбция; M – молярная масса; ρ_{bulk} – плотность упаковки слоя адсорбента.

Скорость адсорбции определяется по упрощенному кинетическому уравнению по модели «линейной движущей силы» [4] (11):

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = K_a (a_{eq} - a) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (11)$$

где E_a – энергия активации; a_{eq} – равновесная адсорбция; R – универсальная газовая постоянная; K_a – константа пропорциональности.

Для определения изменения энергии S_H , учитывающего теплоту адсорбции, используется подход, описанный в [16]. Запишем первый закон термодинамики для конечного объема V слоя адсорбента (12):

$$\sum \Delta H_i - V \Delta p = \sum Q_i + \sum H_{ei}, \quad (12)$$

где ΔH_i – изменение энтальпии различных составляющих адсорбционной системы; Q_i – тепловые потоки, входящие и выходящие из объема V ; H_{ei} – потоки энтальпии, входящие и выходящие из замкнутого объема.

Раскрывая уравнение (12) для конечной расчетной ячейки в ANSYS Fluent в рамках модели и конечного объема слоя адсорбента без использования источников/стоков энергии получаются соотношения (13) и (14) соответственно:

$$\Delta H_a + \Delta H_g - V \Delta p = \sum Q_i + \sum H_{ei} + S_H, \quad (13)$$

$$\Delta H_a + \Delta H_g + \Delta H_{ab} - V \Delta p = \sum Q_i + \sum H_{ei}, \quad (14)$$

где ΔH_a – изменение энтальпии «скелета» адсорбента; ΔH_g – изменение энтальпии газа; ΔH_{ab} – изменение энтальпии адсорбата.

Совершив преобразования над уравнениями (13) и (14), определим недостающий источник энергии S_H в энергетическом балансе расчетной ячейки ANSYS Fluent:

$$S_H = \Delta H_{ab}. \quad (15)$$

Определение стоков массы S_M и изменения энергии S_H через уравнения (10) и (15) осуществлялось при помощи встраиваемых в функционал ANSYS Fluent

пользовательских функций UDF (User Defined Functions), написанных на языке программирования C.

Основные допущения модели:

- в качестве исходных данных по равновесной адсорбции принимаются экспериментальные данные адсорбции метана на активном угле АУ–1 [16–18], а также результаты их обработки в форме энтальпии адсорбата;
- адсорбтив – метан (100%), который считается «реальным газом», теплофизические свойства определяются по базе данных REFPROP v9.1, встроенной в ANSYS Fluent;
- слой адсорбента однородный и изотропный во всем занимаемом им пространстве;
- тепловая и адсорбционно-стимулированная деформация адсорбента считается пренебрежимо малой;
- кинетика адсорбции задается по модели (11) с учетом температуры;
- равновесная модель теплообмена между адсорбентом и адсорбтивом: мгновенный теплообмен исходя из предположения о высокоразвитой поверхности адсорбента;
- начальные условия системы однородны во всем объеме рассчитываемой области;
- изменение давления с начального до рабочего считается мгновенным (начальное значение адсорбции принимается равновесным при 101 325 Па и 293,15 К);
- течение внутри пористой среды принимается ламинарным;
- в газовой области вне адсорбента турбулентность моделируется при помощи k- ω SST модели;
- для повышения сходимости расчета используются гладкие аппроксимационные функции адсорбции $a(p, T)$ и удельной энтальпии адсорбата $h_{ab}(a, T)$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет проводился при различных режимах по температуре и давлению подаваемого газа для циркуляционной заправки ячейки в форме призмы с сечением в виде правильного шестиугольника с вписанным

Таблица 1. Параметры расчетов

Table 1. Calculation parameters

Обозначение геометрии, d , мм	Температурный режим T_{inlet} , К, при давлении p				
	15 бар	25 бар	35 бар	45 бар	55 бар
А (2 мм)	212,0	231,4	246,9	260,4	272,6
Б (4 мм)	208,2	227,5	243,2	256,8	269,1
В (6 мм)	201,4	220,8	236,7	250,6	263,3

диаметром окружности 20 мм и с центральным отверстием с переменным диаметром d (таблица).

При расчёте выполнялось условие постоянного предельного количества аккумулируемого газа $m_{lim} = 7,6$ г на элементарную ячейку или емкости на единицу объема $c_{lim} = 110$ кг/м³ для всех режимов и постоянного массового расхода газа через систему $G_{inlet} = 4$ кг/ч.

В результате математического моделирования получены зависимости продолжительности заправки от температурных режимов работы системы при 95% наполнении от предельного количества аккумулируемого метана, см. рис. 3 (пояснения к рисунку – в тексте ниже).

Полученные зависимости имеют преимущественно монотонно-убывающий характер с ростом температуры и свидетельствуют о сокращении продолжительности заправки при сочетании высоких температур и давлений. В случае геометрии А увеличение температуры на 1 градус в среднем позволило сократить

продолжительность заправки на 3,2 с, а в случае геометрий Б и В – на 2,7 и 2 с соответственно. С увеличением диаметра и соответственно площади поверхности центрального отверстия также происходит сокращение продолжительности заправки. Причем с увеличением диаметра с 2 до 4 мм продолжительность заправки сократилась в среднем на 84 с, или на 13%, а с увеличением диаметра с 4 до 6 мм – на 138 с, или на 25%, т. е. эффект почти в 2 раза больше, что может обуславливаться существенным повышением гидравлического сопротивления адсорбционного блока геометрии А. В случае уменьшения диаметра канала с 6 до 4 мм (в 1,5 раза) и роста потери давления по его длине с 50 до 260 Па (в 5,2 раза) доля потока через слой адсорбента увеличилась с $2 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ кг/ч (в 1,5 раза), а в случае уменьшения диаметра канала с 4 до 2 мм (в 2 раза) и роста потери давления с 260 до 4260 Па (в 16,4 раза) доля потока через слой адсорбента увеличилась с $3 \cdot 10^{-3}$ до 0,224 кг/ч

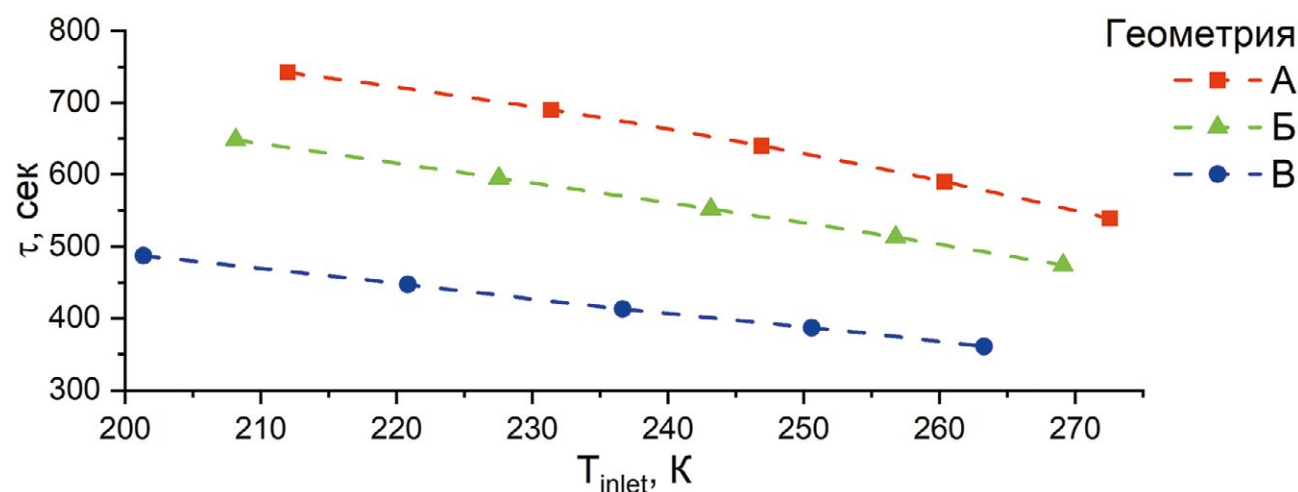


Рис. 3. Зависимость продолжительности заправки до 95% от предельного количества аккумулируемого метана при различных типах геометрии каналов от температурных режимов.

Fig. 3. Dependence of the duration of charging to ~95% of the limiting amount of accumulated methane for various channel geometries under different temperature conditions.

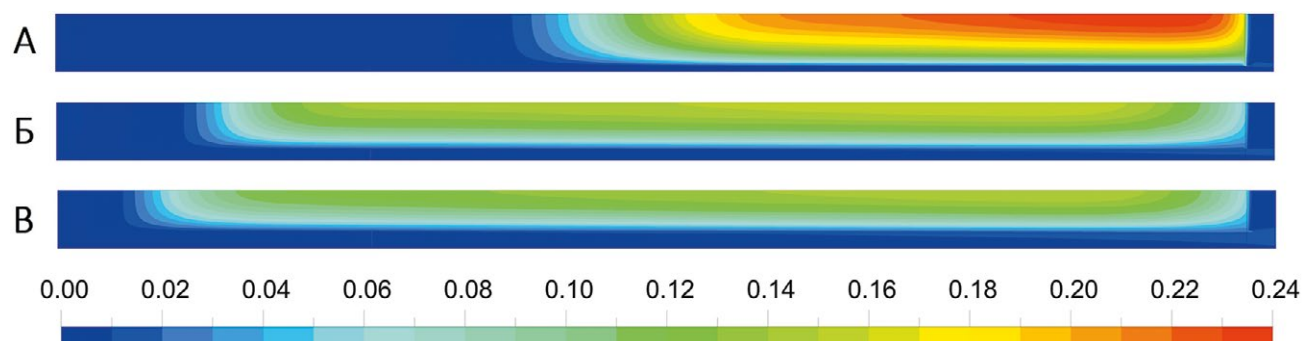


Рис. 4. Температурные поля в безразмерном виде θ для геометрий А, Б и В при давлении 35 бар в момент заполнения адсорбента на 95 % от предельного значения.

Fig. 4. Temperature fields in the dimensionless form θ for geometries A, B, and C at 35-bar pressure at the adsorbent filling of 95% of the limit value.

(в 74,7 раза). Полученные результаты свидетельствует о существенном повышении интенсивности охлаждения с торцевой поверхности со стороны входящего потока в случае геометрии А по сравнению с геометриями Б и В.

Для сравнения температурных профилей при разной геометрии в силу различных температурных режимов введём безразмерную температуру θ , определяемую по формуле (16) и характеризующую степень охлаждения (при $\theta = 0$ полное охлаждение, при $\theta = 1$ – отсутствие охлаждения):

$$\theta = \frac{T - T_{inlet}}{T_{max} - T_{inlet}}, \quad (16)$$

где T_{inlet} – температура подаваемого в систему потока газа; T_{max} – максимальная температура адсорбционной системы.

Температурные поля в безразмерном виде θ , отражающие увеличение интенсивности охлаждения адсорбента с торцевой поверхности адсорбента геометрии А по сравнению с геометрией Б и В для плоскости симметрии расчетной области (рис. 1), представлены на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Повышение давления в циркуляционной системе совместно с повышением температуры подаваемого потока позволяет сократить время циркуляционной

заправки для случаев с одинаковой емкостью аккумуляирования. Установлено, что продолжительность циркуляционной заправки системы АПГ уменьшается с увеличением температуры подаваемого газа на 1 градус в диапазоне от 2 до 3,2 с при уменьшении диаметра канала с 6 до 2 мм соответственно. Более значительно на продолжительность заправки влияет геометрия адсорбционного слоя: увеличение диаметра отверстия с 4 до 6 мм уменьшает продолжительность заправки на 138 с или 25%. Вдвое меньший эффект, около 13%, обеспечивает увеличение диаметра с 2 до 4 мм, что обусловлено изменением характера охлаждения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00421).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 20-19-00421).

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest in financial or any other sphere.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стриженов Е.М., Жердев А.А., Подчуфаров А.А. и др. Энергосберегающая многоступенчатая заправка адсорбционной системы аккумуляирования природного газа // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 11. С. 40–44.
2. Чугаев С.С., Стриженов Е.М., Жердев А.А. и др. Пожаро-взрывобезопасная низкотемпературная заправка адсорбционной системы аккумуляирования природного газа // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 12. С. 32–38.
3. Men'shchikov I.E., Shkolin A.V., Strizhenov E.M. et al. Thermodynamic behaviors of adsorbed methane storage systems based on nanoporous carbon adsorbents prepared from coconut shells // Nanomaterials. 2020. V. 10. № 11. P. 1–26.
4. Vasiliev L.L., Kanonchik L.E., Tsitovich A.P. Adsorption system with heat pipe thermal control for mobile storage of gaseous fuel // Int. J. Therm. Sci. 2017. V. 120. P. 252–262.
5. Zhang L.Z., Wang L. Effects of coupled heat and mass transfers in adsorbent on the performance of a waste heat adsorption cooling unit // Applied Thermal Engineering. 1999. V. 19. № 2. P. 195–215.
6. Patil K.H., Sahoo S. Charge characteristics of adsorbed natural gas storage system based on MAXSORB III // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. V. 52. P. 267–282.
7. Sahoo S., Ramgopal M. Regression equations for predicting discharge performance of adsorbed natural gas storage systems // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 86. P. 127–134.
8. Sahoo S., Ramgopal M. A simple regression equation for predicting charge characteristics of adsorbed natural gas storage systems // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 73. № 1. P. 1093–1100.
9. Стриженов Е.М., Чугаев С.С., Жердев А.А. Математическая модель процесса циркуляционной заправки адсорбционной системы аккумуляирования метана // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 10. С. 38–43.
10. Strizhenov E.M., Chugaev S.S., Men'shchikov I.E. et al. Experimental study of heat transfer in adsorbed natural gas storage system filled with microporous monolithic active carbon // J Phys: Conf. Ser. 2021. V. 2116. № 1. 4 p.
11. Strizhenov E.M., Chugaev S.S., Men'shchikov I.E. et al. Heat and Mass Transfer in an Adsorbed Natural Gas Storage System Filled with Monolithic Carbon Adsorbent during Circulating Gas Charging // Nanomaterials. 2021. V. 11. № 12. P. 1–22.
12. Kanonchik L.E., Vasiliev L.L. Charge dynamics of a low-pressure natural gas accumulator with solid adsorbent, novel thermosyphon and recirculation loop // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 143. P. 118374.
13. Vasiliev L.L., Kanonchik L.E., Kuzmich M., Kulikowski V. Development of thermosyphon controlled adsorptive natural gas storage system // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 185. P. 116–184.

14. Da Silva M.J. M., Sphaier L.A. Dimensionless lumped formulation for performance assessment of adsorbed natural gas storage // *Applied Energy*. 2010. V. 87. № 5. P. 1572–1580.
15. Grande C.A., Vistad Ø. Adequacy versus complexity of mathematical models for engineering an adsorbed natural gas device // *Journal of Energy Storage*. 2020. V. 28. P. 101200.
16. Стриженов Е.М., Жердев А.А. Подчуфаров А.А. и др. Нограмма емкостных и термодинамических свойств адсорбционной системы аккумулирования метана // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2015. № 12. С. 10–14.

17. Стриженов Е.М., Фомкин А.А., Жердев А.А. и др. Адсорбция метана на микропористом углеродном адсорбенте АУ–1 // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 6. С. 521.
18. Стриженов Е.М., Школин А.В., Фомкин А.А. и др. Низкотемпературная адсорбция метана на микропористом углеродном адсорбенте АУ–1 // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2014. Т. 50. № 1. С. 19–25.

REFERENCES

1. Strizhenov EM, Zherdev AA, Podchufarov AA, et al. Energysaving multistage filling of adsorption natural gas storage system. *Chem Pet Eng*. 2015;(11):40–44. doi: 10.1007/s10556-016-0123-7
2. Chugaev SS, Strizhenov EM, Zherdev AA, et al. Fire and explosion-safe low-temperature filling of an adsorption natural gas storage system. *Chem. Pet. Eng*. 2016;(12):32–38. doi: 10.1007/s10556-016-0123-7
3. Men'shchikov IE, Shkolin AV, Strizhenov EM, et al. Thermodynamic behaviors of adsorbed methane storage systems based on nanoporous carbon adsorbents prepared from coconut shells. *Nanomaterials*. 2020;10(11):1–26. doi: 10.3390/nano10112243
4. Vasiliev LL, Kanonchik LE, Tsitovich AP. Adsorption system with heat pipe thermal control for mobile storage of gaseous fuel. *Int. J. Therm. Sci*. 2017;120:252–262. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.06.005
5. Zhang LZ, Wang L. Effects of coupled heat and mass transfers in adsorbent on the performance of a waste heat adsorption cooling unit. *Applied Thermal Engineering*. 1999;19(2):195–215. doi: 10.1016/S1359-4311(98)00023-4
6. Patil KH, Sahoo S. Charge characteristics of adsorbed natural gas storage system based on MAXSORB III. *J. of Natural Gas Science and Engineering*. 2018;52:267–282. doi: 10.1016/j.jngse.2018.01.008
7. Sahoo S, Ramgopal M. Regression equations for predicting discharge performance of adsorbed natural gas storage systems. *Applied Thermal Engineering*. 2015;86:127–134. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.038
8. Sahoo S, Ramgopal M. A simple regression equation for predicting charge characteristics of adsorbed natural gas storage systems. *Applied Thermal Engineering*. 2014;73(1):1093–1100. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.031
9. Strizhenov EM, Chugaev SS, Zherdev AA. Mathematical model of the process of circuit charging of an adsorption methane storage system. *Chem. Pet. Eng*. 2018;10:38–43. doi: 10.1007/s10556-019-00545-5
10. Strizhenov EM, Chugaev SS, Men'shchikov IE, et al. Experimental study of heat transfer in adsorbed natural gas storage system filled with microporous monolithic active carbon. *J Phys: Conf Ser*. 2021;2116(1):4. doi: 10.1088/1742-6596/2116/1/012085
11. Strizhenov EM, Chugaev SS, Men'shchikov IE, et al. Heat and Mass Transfer in an Adsorbed Natural Gas Storage System Filled with Monolithic Carbon Adsorbent during Circulating Gas Charging. *Nanomaterials*. 2021;11(12):1–22. doi: 10.3390/nano11123274
12. Kanonchik LE, Vasiliev LL. Charge dynamics of a low-pressure natural gas accumulator with solid adsorbent, novel thermosyphon and recirculation loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;143:101200. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.024
13. Vasiliev LL, Kanonchik LE, Kuzmich M, et al. Development of thermosyphon controlled adsorptive natural gas storage system. *Applied Thermal Engineering*. 2021;185:116–184. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116184
14. Da Silva MJ M, Sphaier LA. Dimensionless lumped formulation for performance assessment of adsorbed natural gas storage. *Applied Energy*. 2010;87(5):1572–1580. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.011
15. Grande CA, Vistad Ø. Adequacy versus complexity of mathematical models for engineering an adsorbed natural gas device. *J. of Energy Storage*. 2020;28:101200. doi: 10.1016/j.est.2020.101200
16. Strizhenov EM, Zherdev AA, Podchufarov AA, et al. Capacity and thermodynamic nomograph for an adsorption methane storage system. *Chem Pet Eng*. 2015;(12):10–14. doi: 10.1007/s10556-016-0127-3
17. Strizhenov EM, Shkolin AV, Fomkin AA, et al. Adsorption of methane on AU-5 microporous carbon adsorbent. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf*. 2013;49(5):521–527. doi: 10.7868/S0044185613050094
18. Strizhenov EM, Zherdev AA, Smirnov IA, et al. Low-temperature adsorption of methane on microporous AU-1 carbon adsorbent. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf*. 2014;50(1):19–25. doi: 10.7868/S0044185614010148.

ОБ АВТОРАХ

Шелякин Игорь Дмитриевич;
eLibrary SPIN: 4624-5336;
e-mail: shelyakinlife@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Igor D. Shelyakin;
eLibrary SPIN: 4624-5336;
e-mail: shelyakinlife@mail.ru