

Математическая модель технологического процесса абсорбции природного газа

А. Н. Паршуков

В работе получена математическая модель технологического процесса абсорбции как объекта управления. Данная модель описывает процесс абсорбции природного газа и предназначена для автоматического управления этим процессом. Основу модели составляют уравнения материального и теплового балансов. Результаты численного моделирования подтверждают чувствительность поведения процесса к автоматическому регулированию.

Ключевые слова: абсорбция природного газа, математическая модель абсорбера, автоматическое регулирование.

1. Введение

Одним из самых эффективных методов осушки природного газа является абсорбция. Абсорбцией называют процесс поглощения целевого компонента (в данном случае – воды) из газовой или парогазовой смеси специально подобранным жидким поглотителем – *абсорбентом*. Осушка газа обеспечивает непрерывную эксплуатацию газового оборудования и магистральных газопроводов и предотвращает гидратообразование, а также возникновение ледяных заторов в системах. Данный процесс является основным в технологии подготовки природного газа к транспорту на газоконденсатных месторождениях Крайнего Севера.

Анализ статей [1–12], посвящённых разработке автоматизированных систем управления процессами добычи, подготовки и транспортировки природного газа, показал, что в газовой отрасли реконструкции подвергается как технологическое оборудование, так и связанные с ним автоматизированные системы управления. Проведение данных работ вызвано высокими требованиями к качеству подготовки природного газа для его транспортировки, повышением надёжности технологического оборудования в связи с непрерывным характером производства и стремлением к оптимизации режимов работы установок комплексной подготовки газа.

Важным этапом создания современных автоматических систем управления для газовой отрасли является составление математических моделей всех технологических процессов и постановка вычислительных экспериментов.

Моделированию процесса абсорбции посвящено большое количество работ (см., напр., [3–12]). Данные модели, как правило, представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих тепло- и массообменные процессы внутри абсорбера и дополненных граничными условиями. Так, например, в работе [10] математическая модель абсорбера имеет вид следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_G}{\partial t} = -v_G \cdot \frac{\partial C_G}{\partial z} - R_G (C_G - C_G^0), & z \in (0; l_A) \\ \frac{\partial C_A}{\partial t} = f(u) \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} + R_A (C_G - C_G^0), \end{cases} \quad (1)$$

здесь $C_G = C_G(z, t)$ – концентрация газа на высоте z абсорбера в момент времени t ; $C_A = C_A(z, t)$ – концентрация абсорбента на высоте z в момент t ; C_G^0 – концентрация газа на высоте z в установившемся режиме (заранее неизвестная функция от переменной z , подлежит расчёту в процессе решения системы (1)); R_G и R_A – физико-технологические коэффициенты по газу и абсорбенту соответственно; v_G – скорость газа, она зависит от расхода газа Q_G , температуры газа T_G , давления газа P_G по закону:

$$v_G = \frac{V_m \cdot Q_G \cdot P_0 (T_0 + T_G)}{0.785 \cdot T_0 \cdot P_G \cdot D^2},$$

здесь $V_m = 22.4$ л – объем моля идеального газа при нормальных условиях; $T_0 = 273$ К⁰ – нормальная температура; $P_0 = 0.101$ МПа – нормальное давление; D – внутренний диаметр горизонтального сечения абсорбера (вертикальной ректификационной колонны); $f(u)$ – функция управления процессом; l_A – высота абсорбера.

Система уравнений (1) дополняется граничными условиями:

$$C_G(z, t)|_{z=0} = \bar{C}_G(t), \quad C_A(z, t)|_{z=l_A} = \bar{C}_A(t), \quad (2)$$

и начальными условиями:

$$C_G(z, t)|_{t=0} = C_G^0(z), \quad C_A(z, t)|_{t=0} = C_A^0(z). \quad (3)$$

Из системы уравнений (1)–(3) следует, что абсорбер представляет собой распределённый объект управления. Для управления таким объектом необходимо каждый раз решать систему уравнений (1) в частных производных с граничными и начальными условиями (2)–(3). Таким образом, математическую модель вида (1)–(3) невозможно использовать для оперативного управления технологическим процессом абсорбции, поскольку оперативное управление требует немедленной реакции (т.е. управления) на постоянно меняющуюся обстановку (в данном случае – на изменение граничных условий (3)).

Из проведённого анализа следует, что задача разработки новой математической модели абсорбционного процесса, которая позволяла бы управлять процессом в режиме реального времени, остаётся актуальной.

2. Математическая модель процесса абсорбции

Процесс абсорбции газа происходит в абсорберах, установленных на дожимных компрессорных станциях. Схема работы абсорбера показана на рис. 1. В качестве абсорбента применяют раствор диэтиленгликоля (ДЭГ). Газ и абсорбент контактируют внутри аппарата, перемещаясь противотоком. Газ поднимается снизу вверх, а абсорбент по тарелкам стекает сверху вниз. Последний насыщается водой из газа и отправляется вниз на регенерацию. Вверх колонны уходит уже осушенный газ.

При составлении математической модели технологического процесса абсорбции приняты следующие гипотезы:

- 1) извлечению подлежит один компонент газовой фазы (*целевой компонент*) – вода;
- 2) поток газа, направленный вверх, и поток жидкости, направленный вниз, перемещаются без какого-либо перемешивания между элементарными цилиндрическими слоями по оси потока (модель аппарата идеального вытеснения¹, по классификации, изложенной [13, с. 56–57]);
- 3) входные и выходные потоки газа равны, входные и выходные потоки жидкости также равны.

Другие, менее существенные, допущения будут изложены в процессе составления математической модели.

Введём следующие обозначения (см. рис. 1):

M – количество воды, поступающей в процессе абсорбции из газа в жидкость (абсорбент), моль/с;

F^G – поток газа, м³/с;

F^L – поток жидкости, м³/с;

Y_{IN} – начальная концентрация воды в газе, моль/м³;

Y_{OUT} – конечная концентрация воды в газе, моль/м³;

X_{IN} – начальная концентрация воды в жидкости, моль/м³;

X_{OUT} – конечная концентрация воды в жидкости, моль/м³;

T_{IN} – начальная температура жидкости, К⁰;

T_{OUT} – конечная температура жидкости, К⁰;

C – удельная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·К⁰);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

t – время, с.

В стационарном режиме уравнение материального баланса в абсорбере принимает вид:

$$M = F^G (Y_{IN} - Y_{OUT}) = F^L (X_{OUT} - X_{IN}), \quad \text{моль/с.} \quad (4)$$

Абсорбция является неизотермическим химическим процессом: при абсорбции происходит выделение теплоты. Количество выделившейся теплоты Q в стационарном режиме описывается уравнением теплового баланса

$$Q = q \cdot M = qF^L (X_{OUT} - X_{IN}), \quad \text{Дж/с,} \quad (5)$$

здесь q – теплота растворения одного моля воды в одном кубическом метре жидкости, Дж/моль.

¹ Модель аппарата идеального вытеснения означает, что линейная скорость потока целевого компонента в любой точке горизонтального сечения будет одинакова, а от сечения к сечению скорость потока может меняться (например, за счёт изменения объема при осуществлении физико-химического процесса абсорбции), и что перенос тепла путём теплопроводности незначителен.

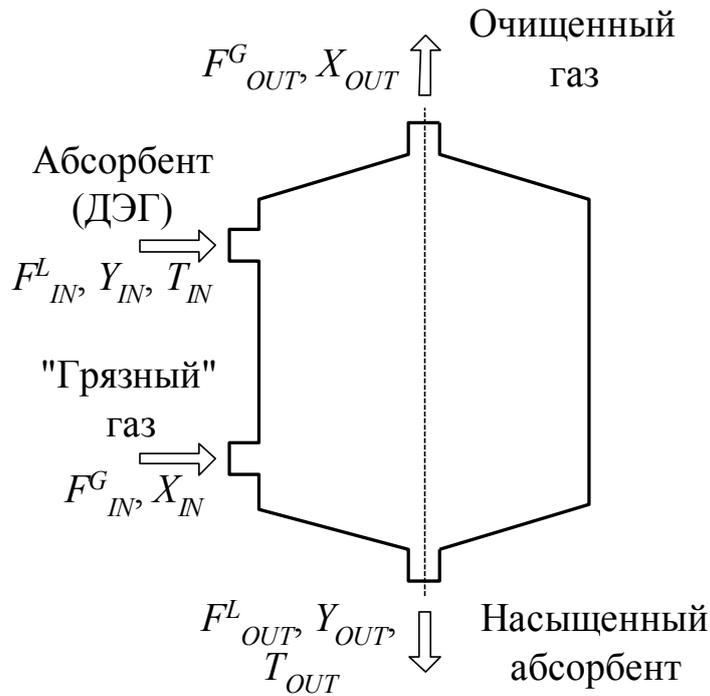


Рис. 1. Схема работы абсорбера

Примем, что вся выделившаяся теплота Q затрачивается на нагрев жидкости (то есть нагревом газа пренебрегаем), тогда

$$Q = c\rho F^L (T_{OUT} - T_{IN}). \quad (6)$$

Известно, что с ростом температуры растворимость газа уменьшается [13, с. 65], следовательно, выделение теплоты является негативным фактором. Негативное влияние повышения температуры стремятся компенсировать, подавая на вход абсорбера охлаждённый абсорбент, то есть уменьшая T_{IN} в (6).

Таким образом, для расчёта стационарного режима работы абсорбера необходимо знать следующие параметры: расход газа F^G , начальную концентрацию воды в газе Y_{IN} , конечную концентрацию воды в газе Y_{OUT} , начальную концентрацию воды в абсорбенте X_{IN} (возможно, что $X_{IN}=0$), начальную температуру абсорбента T_{IN} . А вот расход абсорбента F^L , конечную концентрацию воды в абсорбенте X_{OUT} и конечную температуру абсорбента T_{OUT} заранее знать не можем.

Неизвестные X_{OUT} и F^L связаны уравнением материального баланса (4). Задавшись концентрацией X_{OUT}^* , можем вычислить минимально необходимый расход абсорбента F_{min}^L из уравнения

$$\frac{F_{min}^L}{F^G} = \frac{Y_{IN} - Y_{OUT}}{X_{OUT}^* - X_{IN}}.$$

Следовательно, для нормального протекания процесса абсорбции должно выполняться

$$F^L \geq F_{min}^L,$$

а параметр

$$l = \frac{F^L}{F_{min}^L}$$

назовём коэффициентом избытка абсорбента.

Рассматривая технологический процесс абсорбции как объект управления, можем выделить в качестве *контролируемых* (управляемых) *переменных* два наиболее важных физических параметра процесса – Y_{OUT} и T_{OUT} , в качестве *возмущения* – нестационарность Y_{IN} , в качестве управляющих воздействий (*управления*) – F^L и T_{IN} (см. рис. 2). На практике возможности управления по переменным F^L и T_{IN} довольно ограничены.

Цель управления состоит в стабилизации контролируемых переменных Y_{OUT} и T_{OUT} при изменениях Y_{IN} (колебания Y_{IN} относительно некоторого значения Y_{IN}^0 носят случайный характер, поэтому не могут быть учтены заранее).

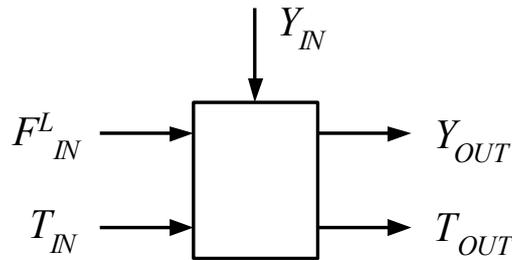


Рис. 2. Процесс абсорбции как объект управления

Математическую модель процесса абсорбции получим из уравнений (4), (5) и (6), выразив в них контролируемые переменные Y_{OUT} и T_{OUT} :

$$\begin{cases} Y_{OUT} = Y_{IN} - \frac{F^L}{FG} (X_{OUT} - X_{IN}), \\ T_{OUT} = T_{IN} + \frac{q}{c\rho} (X_{OUT} - X_{IN}). \end{cases} \quad (7)$$

Переходные процессы в аппарате определяются скоростью газовой фазы (т.е. возникают и затухают практически мгновенно), поэтому следует ожидать, что данная математическая модель будет описывать управляемый процесс с удовлетворительной точностью. Полученная модель (7) позволяет рассчитывать изменения контролируемых переменных и может быть использована для синтеза законов автоматического регулирования процессом.

3. Пример моделирования переходных процессов в абсорбере

Из справочника [14, с. 247] для диэтиленгликоля ($C_4H_{10}O_3$) находим плотность (она задаётся ГОСТом [15]):

$$\rho = 1.118 \cdot 10^3, \quad \text{кг/м}^3,$$

удельную теплоёмкость

$$c = 2.093 \cdot 10^3, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^0},$$

и теплоту растворения одного моля воды в одном куб. м. ДЭГ:

$$q = 1.274 \cdot 10^6, \quad \text{Дж/моль}.$$

Для расчёта коэффициентов модели (4) примем следующие значения рабочего режима:

$$Y_{IN} = Y_{IN}^0 \equiv 0.556, \text{ моль/м}^3, \quad Y_{OUT} = Y_{OUT}^0 \equiv 0, \text{ моль/м}^3, \quad F^G = 6.67 \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}, \\ X_{IN} = 0, \text{ моль/м}^3, \quad X_{OUT} = 0.5, \text{ моль/м}^3.$$

Из 1-го уравнения системы (7) вычисляем значение F^L :

$$F^L = F^G \left(\frac{Y_{IN}^0 - Y_{OUT}^0}{X_{OUT} - X_{IN}} \right) = 8900.4, \text{ м}^3/\text{с},$$

а из 2-го уравнения – температуру абсорбента на входе в аппарат:

$$T_{IN} = T_{OUT} - \frac{q}{c\rho} (X_{OUT} - X_{IN}) = 287.0, \text{ К}^0.$$

Рассмотрим поведение процесса абсорбции при случайных колебаниях Y_{IN} в интервале $\pm 5\%$ от значения Y_{IN}^0 , то есть

$$Y_{IN}(t) = Y_{IN}^0 (1 + \zeta(t)),$$

график случайной величины ζ приведён на рис. 3.

Непосредственно из математической модели (7) находим значения управляющих воздействий:

$$F^L(t) = F^G \left(\frac{Y_{IN} - Y_{OUT}^0}{X_{OUT} - X_{IN}} \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad T_{IN}(t) = 287.0, \text{ К}^0.$$

Поскольку модель (7) статическая, вполне ожидаемо, что график управляющего воздействия F^L (см. рис. 4) меняется почти пропорционально текущему значению возмущения Y_{IN} .

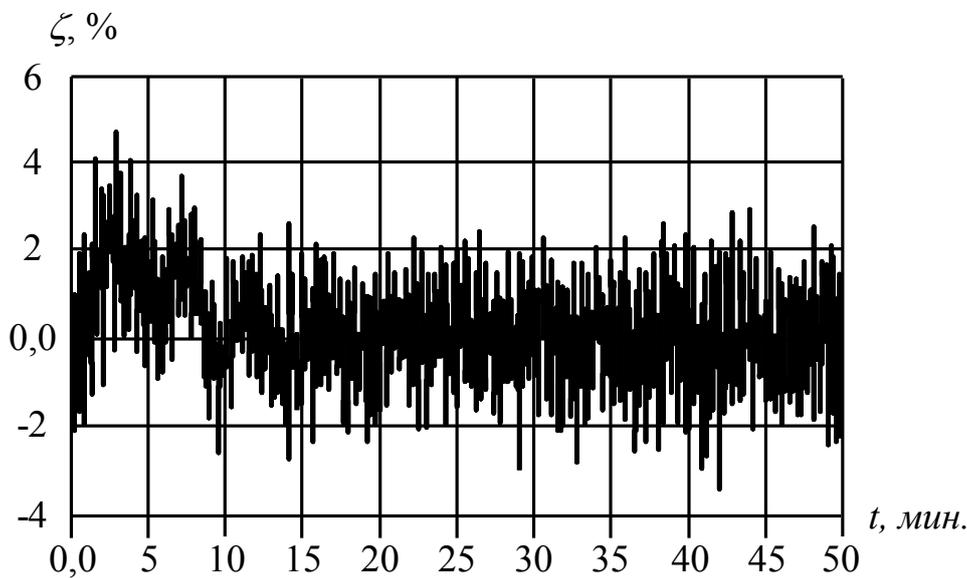
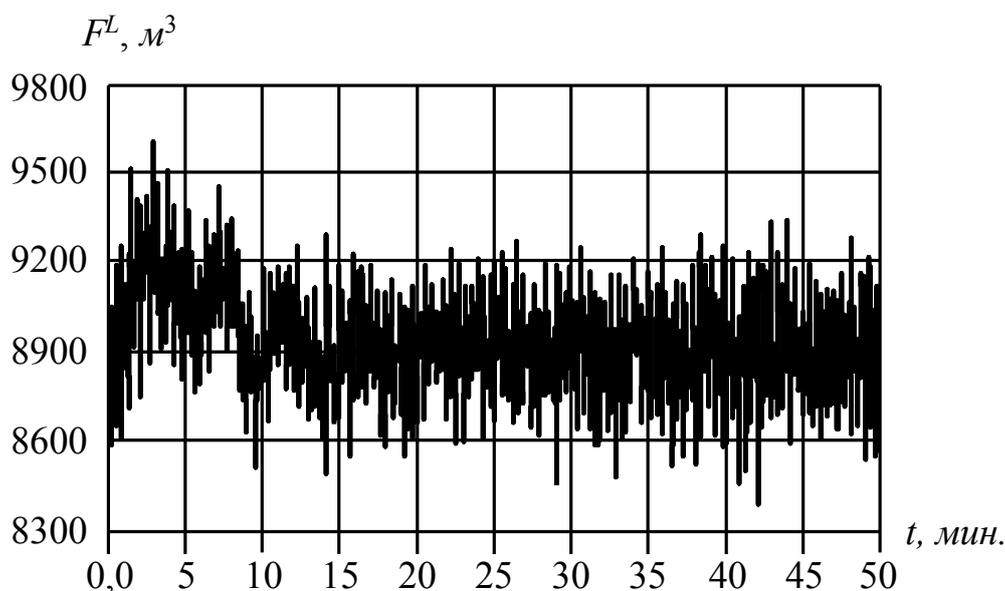


Рис. 3. График изменения возмущения ζ

Рис. 4. График управления F^L

4. Заключение

В настоящей работе предложена новая математическая модель процесса абсорбции. Данная модель предназначена для автоматического управления процессом абсорбции. В статье приведён пример расчета закона регулирования, гарантирующего стабилизацию контролируемых переменных – Y_{OUT} и T_{OUT} .

Литература

1. Мусакаев Н. Г., Хасанов М. К. Математическое моделирование процесса добычи газа из газогидратной залежи с учётом образования льда // Вестник Тюм. гос. ун-та: Физико-математические науки. Информатика. 2014. № 7. С. 43–50.
2. Шляев М. И., Толстых А. В. Моделирование процессов абсорбции газов в барботажных аппаратах // Теплофизика и аэромеханика. 2013. № 5. С. 575–586.
3. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Управление технологическими процессами газодобывающих комплексов // Материалы IX ВНК «Системный синтез и прикладная синергетика», п. Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019. С. 430–439.
4. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Первухин Д. А. Проблемы разработки систем управления газодобывающими комплексами // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 685–692.
5. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Сердитов Ю. Н. Исследование физических процессов в ректификационной колонне при регенерации диэтиленгликоля // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 5. С. 69–78.
6. Исмагилов Р. Н., Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Состояние и перспективы развития автоматизации установок комплексной подготовки газа на УНГКМ // Перспективные направления развития Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. ООО «Газпром добыча Уренгой». Москва: Недра, 2018. С. 271–281.
7. Башкирцева Н. Ю. Переработка природных газов: настоящее и будущее // Газовая промышленность. 2013. № 6. С. 86–87.

8. Бодрый А. Б. Инновации в области адсорбционной осушки углеводородных газов // *Материалы XXVI Всероссийского межотраслевого совещания. ОАО «НИПИгазпереработка»*, Краснодар, 2013. С. 54–56.
9. Бородин А. В. Добыча углеводородного сырья и перспективы интенсификации переработки попутного нефтяного газа // *Нефтепереработка и нефтехимия. Москва: ОАО «ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ»*. 2011. № 4. С. 56–59.
10. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Математическая модель массотеплообменных процессов технологического комплекса абсорбционной осушки газа // *Материалы VI научной конференции «Управление и информационные технологии»*. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. С. 220–224.
11. Бетлинский В. Ю., Жидков М. А., Овчинников В. П. Двухпоточные регулируемые вихревые трубы в промышленных установках очистки и осушки газов // *Газовая промышленность*. 2008. № 1. С. 72–75.
12. Балавин М. А. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов подготовки газа к транспорту: автореферат диссертации канд. техн. наук. Самара, 2000. 24 с.
13. Жоров Ю. М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии. Москва: Химия. 1978. 376 с.
14. Справочник химика / П. Б. Никольский [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Химия, 1968. Т. 5. 976 с.
15. ГОСТ 10136-2019. Международный стандарт. Диэтиленгликоль. Технические условия. Введен 2020-05-01. Москва, 2019. 19 с.

*Статья поступила в редакцию 24.01.2022;
переработанный вариант – 23.02.2022.*

Паршуков Андрей Николаевич

к.т.н., доцент; доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: anparshukov@mail.ru.

References

1. Musakaev N. G., Hasanov M. K. *Matematicheskoe modelirovanie processa dobychi gaza iz gazogidratnoj zalezhi s uchjotom obrazovaniya l'da* [Mathematical modeling of the process of gas production from a gas hydrate deposit under the formation of ice]. *Vestnik Tjum. gos. un-ta: Fiziko-matematicheskie nauki. Informatika*. 2014, no. 7, pp. 43-50.
2. Shiljaev M. I., Tolstyh A. V. *Modelirovanie processov absorbcii gazov v barbotaznyh apparatah* [Simulation of gas absorption processes in bubbling apparatuses]. *Teplofizika i aeromehanika*. 2013, no. 5, pp. 575-586.
3. Abramkin S. E., Dushin S. E. *Upravlenie tehnologicheskimi processami gazodobyvaju-shhih kompleksov* [Control of technological processes of gas production complexes]. *Materialy IX VNK «Sistemnyj sintez i prikladnaja sinergetika»* [Materials of the IX VNK "System synthesis and applied synergetics"], Nizhny Arkhyz village, September 24-27, 2019, pp. 430-439.
4. Abramkin S. E., Dushin S. E., Pervuhin D. A. *Problemy razrabotki sistem upravlenija gazodobyvajushimi kompleksami* [Problems of development of control systems for gas production complexes]. *Izvestija vuzov. Priborostroenie*. 2019, vol. 62, no. 8, pp. 685-692.
5. Abramkin S. E., Dushin S. E., Serditov Ju. N. *Issledovanie fizicheskikh processov v rektifikacionnoj kolonne pri regeneracii dijetilenglikolja 5* [Study of physical processes in a distillation column during the regeneration of diethylene glycol]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*. 2018, no. 5, pp. 69-78.

6. Ismagilov R. N., Abramkin S. E., Dushin S. E. *Sostojanie i perspektivy razvitija avtomatizacii ustanovok kompleksnoj podgotovki gaza na UNGKM* [State and prospects for the development of automation of complex gas treatment units at the UNGCF]. *Perspektivnye napravlenija razvitija Urengoj'skogo kompleksa: sb. nauch. tr. OOO «Gazprom dobycha Urengoj»*. Moscow: Nedra, 2018, pp. 271-281.
7. Bashkirceva N. Ju. *Pererabotka prirodnyh gazov: nastojashhee i budushhee* [Processing of natural gases: present and future]. *Gazovaja promyshlennost'*. 2013, no. 6, pp. 86-87.
8. Bodryj A. B. *Innovacii v oblasti adsorbcionnoj osushki uglevodorodnyh gazov* [Innovations in the field of adsorption drying of hydrocarbon gases]. *Materialy XXVI Vserossijskogo mezhotraslevogo soveshhanija. OAO «NIPIGazpererabotka»* [Materials of the XXVI All-Russian Intersectoral Conference. OJSC NIPIGazpererabotka], Krasnodar, 2013, pp. 54-56.
9. Borodin A. V. *Dобыча углеводородного сырья i perspektivy intensivizacii pererabotki poputnogo nefljanogo gaza* [Production of hydrocarbon raw materials and prospects for intensification of associated petroleum gas processing]. *Neftepererabotka i neftehimija*. Moscow: OJSC "CNIITENEFTEKHIM". 2011, no. 4, pp. 56-59.
10. Abramkin S. E., Dushin S. E. *Matematicheskaja model' massoteploobmennyh processov tehnologicheskogo kompleksa absorbcionnoj osushki gaza* [Mathematical model of mass and heat transfer processes of the technological complex for absorption gas dehydration]. *Materialy VI nauchnoj konferencii «Upravlenie i informacionnye tehnologii»* [Materials of the VI Scientific Conference "Management and Information Technologies"]. St.Peterburg: St.Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2010, pp. 220-224.
11. Betlinskij V. Ju., Zhidkov M. A., Ovchinnikov V. P. *Dvuhpotochnye reguliruemye vihrevye trubny v promyshlennyh ustanovkah ochistki i osushki gazov* [Double-flow adjustable vortex tubes in industrial gas cleaning and drying plants]. *Gazovaja promyshlennost'*. 2008, no. 1, pp. 72-75.
12. Balavin M. A. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov podgotovki gaza k transportu* [Mathematical modeling and optimization of technological processes of gas preparation for transport]: *avtoferat dissertacii kand. tehn. nauk*. Samara, 2000, 24 p.
13. Zhorov Ju. M. *Modelirovanie fiziko-himicheskikh processov neftepererabotki i neftehimii* [Modeling of physical and chemical processes of oil refining and petrochemistry]. Moscow: Chemistry, 1978, 376 p.
14. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. P. B. Nikol'skij [i dr.]. 2-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Chemistry, 1968, vol. 5, 976 p.
15. GOST 10136-2019. *Mezhdunarodnyj standart. Dijetilenglikol'. Tehnicheskie uslovija* [International standard. Diethylene glycol. Specifications.]. Introduced 2020-05-01. Moscow, 2019, 19 p.

Mathematical model of the natural gas absorption technological process

Andrey N. Parshukov

Candidate of technical sciences, Docent, Industrial University of Tyumen (Tyumen, Russia),
anparshukov@mail.ru.

In the paper, a mathematical model of the absorption technological process as an object of management is obtained. This model describes the process of natural gas absorption and is designed to control this process automatically. The model is based on the equations of material and thermal balances. The results of numerical simulation confirm the sensitivity of the process behavior to automatic regulation.

Keywords: natural gas absorption, mathematical model of the absorber, automatic regulation.