

УДК 533.6.011.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0010

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕДУЦИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2021

Цветова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика»

Хахалев Юрий Андреевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика».

Ульяновский государственный технический университет

(432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, e-mails: katf0k@mail.ru, kvn@ulstu.ru, ulstu-td-ua@mail.ru)

Аннотация. Эффективным способом решения проблемы ресурсо- и энергосбережения в системе транспортирования и распределения природного газа является безогневой подогрев газа посредством устройства газодинамической температурной стратификации. В работе предложена методика моделирования процесса газодинамической температурной стратификации, позволяющая учитывать воздействие дисперсной фазы на обменные процессы, протекающие в пограничном слое газовых потоков. Моделирование дает возможность выявления и отработки методов управления пограничным слоем газовых потоков, обосновать конструктивные решения для интенсификации обменных процессов в пограничном слое регулятора давления природного газа с безогневым подогревом. Приведены результаты компьютерного исследования процесса газодинамической температурной стратификации в устройстве безмашинного энергоразделения (трубе Леонтьева) для трех рабочих тел. Установлено, что несмотря на то, что природный газ (метан) является не самым высокопотенциальным носителем, имеется возможность существенного повышения эффективности температурной стратификации дисперсного рабочего тела путем модификации потока нано-структурами.

Ключевые слова: газодинамическая температурная стратификация, дисперсный поток, безогневой подогрев газа, интенсификация теплоотдачи.

MODELING AND RESEARCH OF THE PROCESS OF GAS DYNAMIC TEMPERATURE STRATIFICATION TO INCREASE THE EFFICIENCY OF REDUCING NATURAL GAS

© 2021

Tsvetova Ekaterina Vladimirovna, candidate of Technical Sciences,
associate Professor of the Department of "Thermal and Fuel Energy"

Kovalnogov Vladislav Nikolaevich, doctor of Technical Sciences,
head of the Department "Thermal and Fuel Energy"

Khakhalev Yuriy Andreyevich, candidate of Technical Sciences,
associate Professor of the Department of "Thermal and Fuel Energy"

Ulyanovsk State Technical University

(432027, Russia, Ulyanovsk, street Severny Venets, 32, e-mails: katf0k@mail.ru, kvn@ulstu.ru, ulstu-td-ua@mail.ru)

Abstract. A solution to the problem of resource and energy saving in the natural gas transport and distribution system is proposed - fireless gas heating by means of a gas-dynamic temperature stratification device. The paper considers the modeling of the process of gas-dynamic temperature stratification, which makes it possible to take into account the effect of the dispersed phase on the exchange processes occurring in the boundary layer of gas flows. An urgent direction of research is the search and development of methods for controlling the boundary layer of gas flows, which make it possible to intensify exchange processes in the boundary layer of a natural gas pressure regulator with fireless heating. The results of a computational study of the efficiency of gas-dynamic temperature stratification in a machineless energy separation device (Leontief tube) for three working bodies are presented. According to the results of the study, it was revealed that natural gas (methane) is not the most high-potential carrier, but there is a technological problem to increase the efficiency of temperature stratification of methane. The increase in the efficiency of gas-dynamic temperature stratification of natural gas was carried out by modifying the flow with nano-structures. In this work, for the first time, the possibility of a significant increase in the efficiency of temperature stratification of a dispersed working fluid, in which methane is the transporting medium, has been established.

Keywords: gas-dynamic temperature stratification, disperse flow, fireless gas heating, heat transfer enhancement.

Введение. Газотранспортные предприятия нуждаются в частичном расходовании природного газа на собственные нужды. На газораспределительных станциях (ГРС) при дросселировании газа происходит

снижение его температуры, что приводит к обмерзанию газопроводов и образованию газовых гидратов [1].

Предотвращают гидратообразование на ГРС пу-

тем «огневого» подогрева газа (сжигают около 1% от объема транспортируемого газа) и ввода в газопровод ингибиторов гидратообразования (метанола). Данные методы борьбы с гидратообразованием сопряжены с материальными вложениями на вводимые ингибиторы гидратообразования и с затратами газа на «огневой» подогрев.

В настоящее время актуальной задачей является поиск новых энергосберегающих способов подогрева газа при редуцировании.

Для повышения температуры газа и предотвращения обмерзания газового оборудования предлагается внедрение устройств газодинамической температурной стратификации (безмашинного энергоразделения) в узел редуцирования ГРС. Природа энергоразделения потока зависит от вызывающих его причин, среди которых движущиеся потоки с завихрениями, ударные волны и пульсации давления [2]. Данные эффекты легли в основу работы устройств для энергоразделения газов. На ГРС могут найти свое практическое приложение такие виды энергоразделения как:

1) температурная стратификация в сверхзвуковом потоке [3,4];

2) вихревой эффект Ранка – Хилша [5 – 7];

3) эффект Гартмана – Шпренгера [8 – 11].

В данной работе исследуется способ температурной стратификации для энергоразделения.

Газодинамический метод энергоразделения, реализованный в трубе температурной стратификации сверхзвукового потока, предложен академиком Леонтьевым А.И. [12, 13]. Температурное разделение потока обусловлено различием температур в трактах трубы Леонтьева (дозвуковом и сверхзвуковом). Пере-

даваемый тепловой поток определяет эффективность стратификации. На рисунке 1 изображена схема регулятора давления природного газа на основе газодинамической температурной стратификации, принцип его действия известен из литературы [14].

Для предварительного подогрева газа используется безмашинное устройство энергоразделения – сверхзвуковая труба температурной стратификации. Основным элементом регулятора, схема которого представлена на рисунке 1, является сопло Лавалия, проходя через которое газ разгоняется до сверхзвуковой скорости, при этом происходит его нагрев. Далее газ захлаживается в межтрубном пространстве.

Схема процесса газодинамической температурной стратификации (один элемент кожухотрубного теплообменника 16 на рисунке 1 – сверхзвуковая труба температурной стратификации) показана на рисунке 2. За счет отличия адиабатной температуры T_{r2} стенки 3 со стороны сверхзвукового тракта 5 от температуры торможения T^* и адиабатной температуры T_{r1} стенки со стороны дозвукового тракта 2 происходит энергоразделение потока – теплообмен в направлении от дозвукового к сверхзвуковому потоку через разделительную стенку. Рассмотрим особенности моделирования процесса газодинамической температурной стратификации с учетом воздействия дисперсной фазы на обменные процессы, протекающие в пограничном слое газовых потоков.

Целью исследования является поиск способов управления пограничным слоем газовых потоков, способствующих интенсификации обменных процессов в пограничном слое регулятора давления природного газа с безогневым подогревом.

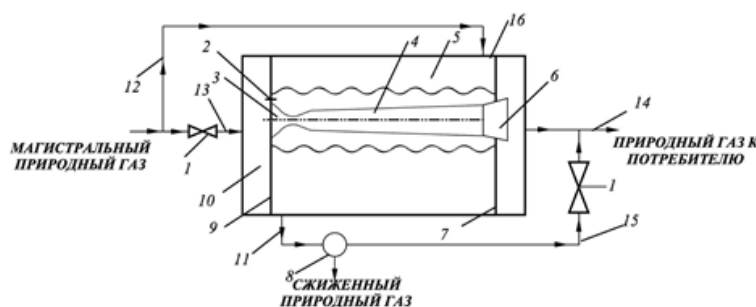


Рисунок 1 – Схема регулятора давления природного газа с безогневым подогревом и получением сжиженного природного газа на базе устройства газодинамической температурной стратификации: 1 – узел регулирования расхода газа; 2 – отсекающий клапан; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – пучок сверхзвуковых каналов; 5 – межтрубное пространство; 6 – диффузор; 7,9 – трубные доски; 8 – устройство утилизации холода; 10 – приемная камера; 11 – линия захлаживания газа; 12 – линия газа из магистрального газопровода; 13 – линия поступления газа в приемную камеру; 14 – линия газа к потребителю; 15 – линия газа после устройства утилизации холода; 16 – кожухотрубный теплообменник.

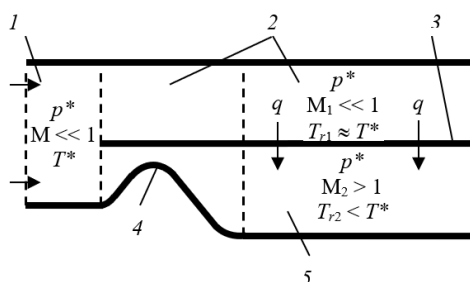


Рисунок 2 – Схема температурной стратификации: 1 – входная камера; 2 – тракт дозвукового течения; 3 – разделительная стенка; 4 – сверхзвуковое сопло; 5 – тракт сверхзвукового течения

Материалы и результаты исследования. *Математическая модель и численное исследование.* Плотность теплового потока, характеризующая эффективность температурной стратификации:

$$q = k(T_{r1} - T_{r2}), \quad (1)$$

где коэффициент теплопередачи k равен

$$k = 1/(1/\alpha_1 + 1/\alpha_2). \quad (2)$$

Из выражений (1), (2) следует, что для повышения теплового потока необходимо увеличивать коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 .

Анализируя литературу по тематике исследования, можно заключить, что основными методами повышения эффективности температурной стратификации являются применение рабочих тел с малыми числами Прандтля (Pr) [15, 16] и возмущение сверхзвукового пограничного слоя посредством вдува газа [17]. Заметим, что газовые смеси с малыми числами Прандтля являются дорогостоящими и по этой причине не находят широкого применения в технике стратификации. Поэтому доступными рабочими телами в исследова-

тельской практике остаются бюджетные газовые смеси (воздух, водородо-аргоновые смеси и т.д.) с числами $Pr = 0,45 \dots 0,75$. Таким образом, значительного повышения эффективности газодинамической температурной стратификации таких рабочих тел добиться не удастся, поэтому возникает стратегическая задача поиска активных методов воздействия на сверхзвуковой пограничный слой для уменьшения коэффициента восстановления температуры.

В целях повышения эффективности стратификации в работах [18 – 21] предложено использовать дисперсное рабочее тело, движущееся с целенаправленной закруткой потока в проточной части устройства температурной стратификации [19]. Наблюдается повышение показателей энергоразделения дисперсного рабочего тела за счет инерционного выпадения частиц на стенку в пограничном слое. Коэффициенты теплоотдачи увеличиваются, но одновременно происходит снижение коэффициента восстановления температуры в сверхзвуковом потоке.

Учитывая зависимости для газодинамических функций параметров состояния, плотность теплового потока определяется:

$$\bar{q} = \varepsilon \cdot \frac{(1-r_1)\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M_1^2\right)^{-1} + (r_1-r_2) - (1-r_2)\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M_2^2\right)^{-1}}{1+\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \left[M_1^2 Pr^{\frac{\gamma R_0(\gamma+1)}{\gamma_0 R(\gamma+1)}} \right]^{0,4} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{0,8}{\gamma-1}} \left(\frac{\gamma_0+1}{2} \right)^{\frac{0,8}{\gamma_0-1}} \left[\left(\frac{2}{\gamma+1} \right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right) \right]^{\frac{0,4(1+\gamma)}{1-\gamma}}; \quad (4)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \left(\frac{\rho_1 u_1}{\rho_2 u_2} \right)^{0,8} \frac{\left(1 + r_2 \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right)^{-0,11}}{\left(1 + 5 \cdot 10^9 Re_{wx2} G^2 \right)^{0,2}} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{0,8} \left(\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2} \right)^{\frac{0,4(1+\gamma)}{1-\gamma}} \frac{\left(1 + r_2 \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right)^{-0,11}}{\left(1 + 5 \cdot 10^9 Re_{wx2} G^2 \right)^{0,2}}. \quad (5)$$

где: \bar{q} – относительный тепловой поток;

r – коэффициент восстановления температуры;

γ – показатель адиабаты;

M – число Маха;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

λ – теплопроводность рабочего тела, Вт/(м·К);

Pr – число Прандтля;

ρ – плотность рабочего тела, кг/м³;

u – скорость, м/с;

Re – число Рейнольдса;

G – обобщенная переменная, отвечающая за влияние дисперсных частиц;

Значения подстрочных индексов в формулах:

0 – величины во входной камере или масштабные значения;

1 – величины дозвукового тракта;

2 – величины сверхзвукового тракта;

w – величины при определяющей температуре стенки;

x – величины, имеющие в качестве определяющего размера продольную координату.

Течение дисперсного потока лишено инерционного выпадения частиц в пограничном слое дозвукового тракта устройства стратификации, в связи с этим коэффициент восстановления температуры может быть определен как для однородного газового потока: $r_1 = \sqrt[3]{Pr}$. Коэффициент восстановления потока,

движущегося в сверхзвуковом тракте устройства, где организовано инерционное выпадение дисперсных частиц в пограничном слое, можно найти из выражения [22]:

$$r_2 = \frac{\sqrt[3]{Pr}}{1 + 28,67 G^{0,3}}. \quad (6)$$

Здесь G – обобщенная переменная, отвечающая за влияние дисперсных частиц [22].

Анализируя выражения (3) – (6), можно заключить, что на эффективность температурной стратификации оказывают влияние множество факторов: γ , Pr ; M_1 и M_2 ; G ; Re_{wx2} ; относительный коэффициент теплопроводности рабочего тела λ/λ_0 ; относительное значение газовой постоянной R/R_0 . Из них четыре величины (γ , Pr ; λ/λ_0 , R/R_0) являются связанными и определяют вид рабочего тела.

Исследование выполнялось в несколько этапов. На первом этапе исследовался потенциал газодинамической температурной стратификации для однородного природного газа по сравнению с другими видами рабочего тела. Расчеты выполнены при фиксированных значениях параметров: $\gamma = 1,4$; $\lambda/\lambda_0 = 1$; $R/R_0 = 1$. Результаты исследования показаны на рисунках 3, 4.

Характер воздействия вида рабочего тела и числа Маха M_2 сверхзвукового тракта на плотность теплового потока иллюстрируется графиками рисунке 3, полученными при $M_1 = 0,5$.

Проанализированы рабочие тела с тремя видами

широко используемых в технике газов (воздух, гелий, метан), значения определяющих критериев для них приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исследуемые рабочие тела и их характеристики

Газ	γ	Pr	λ/λ_0	R/R_0
Воздух	1,40	0,702	1,0	1,0
Гелий	1,66	0,670	5,77	7,24
Метан	1,32	0,786	1,2	1,81

В связи с тем, что природный газ представляет собой смесь газообразных углеводородов, главным составляющим компонентом которой является метан и примеси других алканов, в качестве рабочего тела, используемого в регуляторе давления природного газа с безогневым подогревом принят метан.

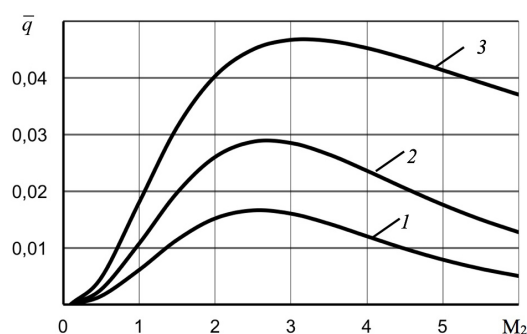


Рисунок 3 – Влияние вида рабочего тела и числа Маха в сверхзвуковом тракте на эффективность температурной стратификации: 1 – метан; 2 – воздух; 3 – гелий

На рисунке 3 наглядно представлено, что плотность теплового потока \bar{q} зависит от числа Маха M_2 по кривой с максимумом для всех проанализированных рабочих тел. Плотность теплового потока достигает своего максимума при $M_2 \approx 2,5$. Максимальная эффективность температурной стратификации зафиксирована при использовании в качестве рабочего тела гелия.

Результаты исследования показали, что природный газ (метан) является не самым высокопотенциальным носителем, однако может быть поставлена и решена технологическая задача по повышению эффективности температурной стратификации природного газа. Оценка эффективности температурной стратификации метана при модификации потока наноструктурами проводилась на втором этапе исследования.

Влияние на температурную стратификацию дисперсного потока (нано-структур, характеризующихся критерием G), отображено графиками (рис. 4), полученными ($M_1=0,5$, $Re_{\text{мх2}}=5 \cdot 10^5$) для дисперсного потока метана. Как следует из графиков, дисперсность рабочего тела позволяет значительно увеличить плотность теплового потока \bar{q} по сравнению с однородным потоком. Если сравнивать полученные результаты с известными данными [18 – 21], то обнаруживается, что добавки в природный газ (дисперсный поток) в разы интенсифицируют процесс газодинамической температурной стратификации природного газа.

Как видно из рисунка 4, добавки в природный газ (дисперсный поток) в разы интенсифицируют эффективность газодинамической температурной стратификации природного газа.

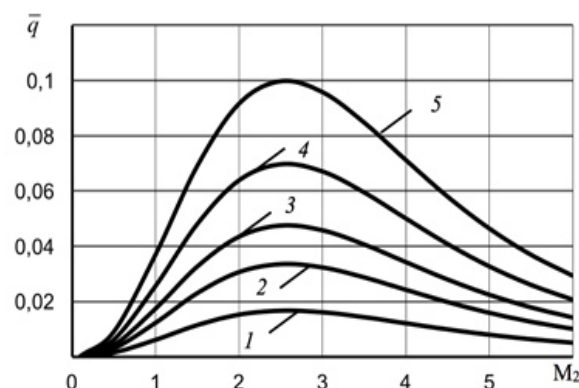


Рисунок 4 – Влияние факторов M_2 , G на температурную стратификацию в дисперсном потоке: 1 – $G = 0$ (однородный поток); 2 – $5 \cdot 10^{-9}$; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$; 4 – $5 \cdot 10^{-7}$; 5 – $5 \cdot 10^{-6}$

Заключение. Таким образом, как показало моделирование по предложенной методике, использование дисперсного рабочего тела позволяет значительно повысить эффективность газодинамической температурной стратификации (увеличения передаваемого теплового потока), что имеет большую практическую значимость при транспортировке природного газа с распределенными в нем частицами конденсированной фазы – безогневым подогреве газа посредством газодинамической температурной стратификации газового потока. Моделирование дает основания для совершенствования процессов управления пограничным слоем газовых потоков (дисперсное рабочее тело), а также выявить конструктивные решения для интенсификации обменных процессов в пограничном слое регулятора давления природного газа с безогневым подогревом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ-2493.2020.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Катаев, К.А. Гидратообразование в трубопроводах природного газа/ К.А. Катаев // Всероссийский журнал научных публикаций. – 2011. – № 1 (2).
2. Гурин С.В. Разработка технологии квазизотермического редуцирования давления для объектов системы транспортировки и распределения природного газа: дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2008.
3. Здитовец, А.Г. Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения воздушных потоков в трубе Леонтьева/ А.Г. Здитовец, Ю.А. Виноградов, М.М.Стронгин // Тепловые процессы в технике. № 9. – 2015. – С. 397–404.
4. Попович С.С. Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2016.
5. Белоусов А.М. Вихревая труба Ранка – Хилша как перспективное устройство получения низких температур / А.М. Белоусов, И.Х. Исрафилов, С.И. Харчук // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». Изд-во С.-Пб. НИУ ИТМО. – 2014. – № 2. – С.36–44.
6. Регулятор давления газа РДУ-Т – новый способ борьбы с гидратообразованием [Электронный ресурс]. Режим

доступа URL: <http://www.staroruspribor.ru/articles/view/282.htm> (дата обращения 09.05.2021)

7. Хаит А.В. Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2012. – 199 с.

8. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: «Высшая школа», 1978. – 448 с.

9. Ли Чжун Мин Исследование термоакустического нагрева газа в газоструйных генераторах Гартмана: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004.

10. Елисеев Ю.Б., Черкез А.Я. Об эффекте повышения температуры торможения при обтекании газом глубоких полостей. // Механика жидкости и газа. – 1971. – № 3. – С. 8–18.

11. Парфенов Д.В. Предупреждение нагрева элементов крановых узлов при заполнении газом участков магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2018.

12. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады академии наук. Энергетика, 1997. – Т. 354. – № 4. – С. 475–477.

13. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева). Патент на изобретение № 2106581. Приоритет 23.05.1996. Публикация 10.03.1998.

14. Научные основы технологий XXI века / под ред. Леонтьева А.И., Пилюгина Н.Н., Полежаева Ю.В., Поляева В.М.. – М.: «Энергомаш». – 2000. – 135 с.

15. Виноградов Ю.А. Измерение равновесно температуры стенки сверх- звукового сопла при течении смеси газов с низкими значениями числа Прандтля / Ю. А. Виноградов, И. К. Ермолаев, А. Г. Здитовец, А. И. Леонтьев // Известия академии наук. Энергетика. – 2005. – № 4. – С. 128–133.

16. Леонтьев, А. И. Коэффициент восстановления в сверхзвуковом потоке газа с малым числом Прандтля / А. И. Леонтьев, В. Г. Луцкий, А. Е. Якубенко // ТВТ. – Т. 44. – № 2. – 2006. – С. 238 – 245.

17. Бурцев, С.А. Температурная стратификация в сверх- звуковом потоке газа / С. А. Бурцев, А. И. Леонтьев // Известия академии наук. Энергетика. – 2000. – № 5. – С. 101–113.

18. Ковальногов В.Н., Цветова Е.В., Федоров Р.В., Петров А.В. Математическое моделирование и исследование эффективности газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 1 (31) 2013. – С. 40 – 46.

19. Ковальногов Н.Н., Магазинник Л.М., Федоров Р.В. Сверхзвуковая труба температурной стратификации. Патент на изобретение № 2334178. Приоритет 09.03.2007. Публикация 20.09.2008.

20. Цветова Е.В., Ковальногов В.Н., Федоров Р.В. Исследование эффективности комплексных методов интенсификации теплоотдачи при газодинамической температурной стратификации // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2020. – № 2-3 (90-91). – С. 24-28.

21. E. V. Tsvetova, V.N. Kovalnogov, R. V. Fedorov, “Research of Integrated Passive Methods of Heat Dissipation Intensification to Improve the Efficiency of Gas-Dynamic Temperature Stratification”, Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics 15(1-2): 13-16 (2020).

22. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: Изд-во Ул-ГТУ. 1996. 246 с.

Статья поступила в редакцию 20.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021