

УДК 621.594

## Анализ процесса кристаллообразования диоксида углерода в проточной части центростремительного турбодетандера

Канд. техн. наук **Данилов М.М.** refmach@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Разработанная автором математическая модель вымораживания диоксида углерода в низкотемпературных турбодетандерах позволяет проанализировать основные стадии процесса кристаллообразования. Сопоставляется скорость образования кристаллов-зародышей и растущая удельная масса кристаллов в единице объема расширяющегося газового потока. Прослеживается изменение размеров образующихся и растущих кристаллов, а также среднего размера получаемых кристаллов. Указывается на взаимосвязь роста размеров и удельной массы кристаллов. Приводится сравнение изменений удельной массы кристаллов и размеров основной массы кристаллов при различных начальных параметрах расширяемой газовой смеси: давления и концентрации паров диоксида углерода. Важным результатом проведенного анализа стал вывод о том, что основной рост кристаллов происходит за зоной Вильсона.*

**Ключевые слова:** кристаллы, удельная масса, размер кристалла, диоксид углерода, кристаллообразование, переохлаждение потока.

doi: 10.17586/2310-1148-2016-9-17-22

---

## Analysis of the crystal formation process of carbon dioxide in a flowing part of the centripetal turbine expander

Ph.D. **Danilov M.M.** refmach@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov St., 9

*The mathematical model developed by the author of freezing carbon dioxide in the low-temperature expansion turbines allows to analyze the main stages of the process of crystal formation. Matches rate of crystal nucleation and crystal growing specific weight per unit volume of the expanding gas stream. Track changes the image size and the growing crystals, as well as the average size of the resulting crystals. It indicates the relationship size growth and specific mass of crystals. The comparison of changes in the specific gravity of the crystals and the size of the bulk crystals with different initial parameters expandable gas mixture: pressure and vapor concentration of carbon dioxide. An important result of the analysis was the conclusion that the main crystal growth occurs behind the Wilson area.*

**Keywords:** crystals, specific gravity, the size of the crystal, carbon dioxide, crystal formation, hypothermia flow.

---

Получение твердого диоксида углерода (сухого льда) в объеме расширяющегося в турбодетандере газовой холодильной машины потока газовой смеси экспериментально исследовано [1, 2] и предложена математическая модель, которая позволяет отслеживать изменение вдоль проточной части турбодетандера скорости образования кристаллов-зародышей диоксида углерода, массовой концентрации образующихся и растущих кристаллов, а также их размеров [3].

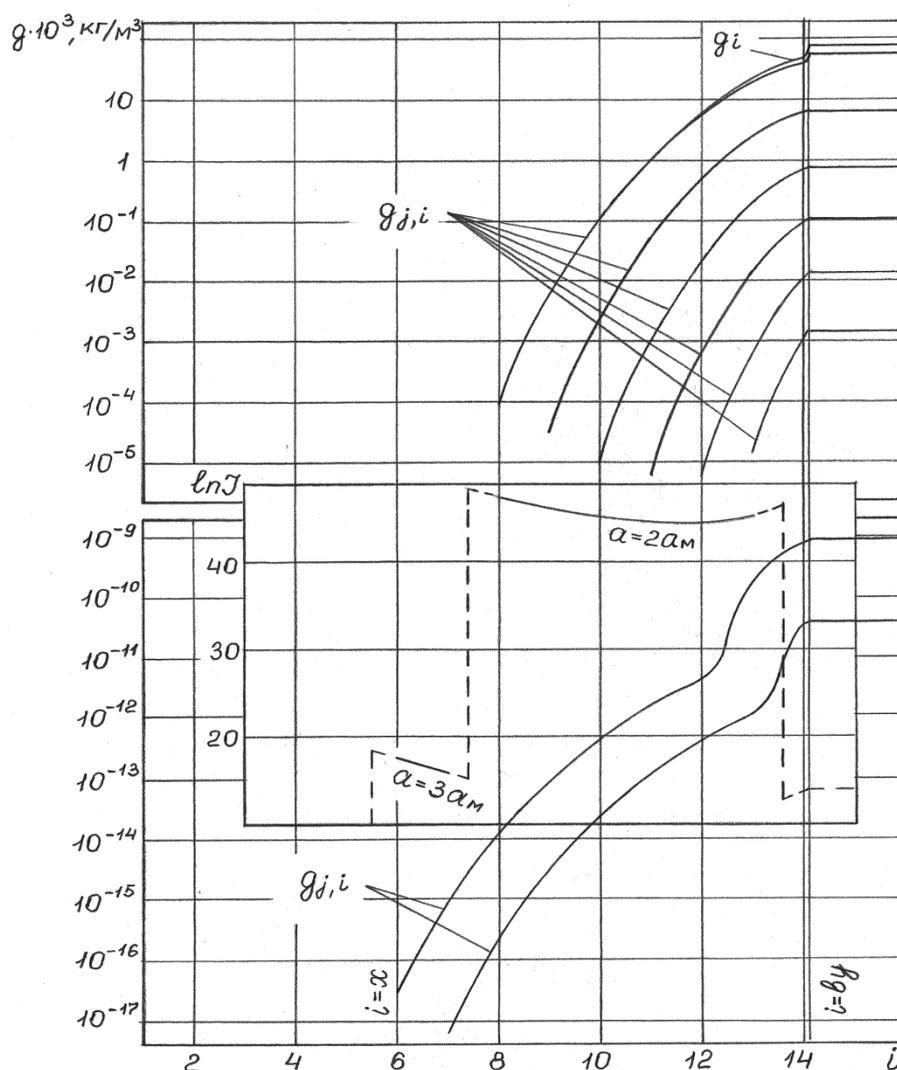
Разбивка проточной части центростремительного турбодетандера на участки, а также изменение степени переохлаждения потока вдоль проточной части, место расположения и протяженность зоны кристаллообразования рассмотрены в работе [4].

Изменение скорости образования кристаллов-зародышей и массовой концентрации образующихся в каждом из последовательных сечений (участков) и растущих кристаллов диоксида углерода можно проследить на примере расширения газовой смеси с начальным давлением  $P_{см,0} = 2,0 \cdot 10^5$  Па

и начальной концентрацией паров диоксида углерода  $r_{\text{CO}_2,0} = 0,05$  (рис. 1), при котором протяженность процесса кристаллообразования будет наибольшей.

Скорость образования кристаллов-зародышей в большей степени зависит от размеров образующихся кристаллов. В работе [5] определен возможный диапазон этих размеров (параметров кристалла  $a$ ) при их дискретном увеличении от  $a = 2a_m$  до  $a = 5a_m$ , где  $a_m$  – параметр молекулярного кристалла [6]. Для процесса кристаллообразования при вымораживании диоксида углерода в низкотемпературных турбодетандерах характерно образование кристаллов-зародышей с параметром кристалла  $a = 2a_m$  и  $a = 3a_m$  [7], причем с увеличением степени переохлаждения потока вдоль проточной части турбодетандера [4] вначале образуются более крупные кристаллы ( $a = 3a_m$ ), количество, а следовательно и удельная масса которых невелики, а затем более мелкие ( $a = 2a_m$ ), количество и масса которых возрастает на несколько порядков.

Расположение стартовых точек роста массовой концентрации, т.е. удельной массы кристаллов-зародышей, образовавшихся на каждом из последующих участков, начиная с участка начала кристаллообразования ( $i = x$ ), адекватно характеру изменения скорости образования центров кристаллизации, которая, в пределах одного и того же параметра  $a$ , сначала уменьшается вследствие понижения температуры потока при его расширении, а затем возрастает, следуя повышению температуры вследствие подвода к потоку теплоты фазового перехода (рис.1).



**Рис. 1.** Изменение скорости образования кристаллов-зародышей  $J, 1/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$  и удельной массы кристаллов  $g$  вдоль проточной части центростремительного турбодетандера ( $i$  – номер участка) при начальных параметрах  $P_{\text{см},0} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $r_{\text{CO}_2,0} = 0,05$

Изменение характера кривых  $g_{j,i}$  ( $j$  – номер участка, на котором образовались кристаллы-зародыши) для  $j = 6$  на  $i = 13$ , для  $j = 7$  на  $i = 14$  и для  $j = 8$  на  $i = by$  связано с переходом приращения удельной массы кристаллов с микроскопического на макроскопический уровень, когда размер кристаллов становится больше длины свободного пробега молекул газовой смеси [8]. Приращение удельной массы кристаллов заканчивается на участке  $by$ , когда переохладение потока  $\Delta T$  полностью снимается за счет подвода к потоку теплоты фазового перехода. Так как участки проточной части имеют определенную длину [4], то поток может достигнуть состояния насыщения ( $\Delta T = 0$ ) еще до окончания этого участка ( $I = y$ ), поэтому вводится коэффициент  $b$ , который уменьшает длину участка ( $b = 0,1...0,9$ ). В рассматриваемом случае  $I = 15$ , а  $b = 0,2$ , т.е. процесс кристаллообразования заканчивается на двадцати процентах длины пятнадцатого участка. Основное влияние на величину суммарной получаемой массы кристаллов (удельной массы  $g_i$  на участке  $by$ ) оказывает масса кристаллов, образовавшихся на участке  $I = 8$ , т.е. на том участке, где впервые начали появляться кристаллы-зародыши с параметром  $a = 2a_m$ , чему способствует достижение потоком второго критического переохладения.

Аналогичный вывод можно сделать, если на том же примере проследить за изменением размера растущих кристаллов (рис. 2).

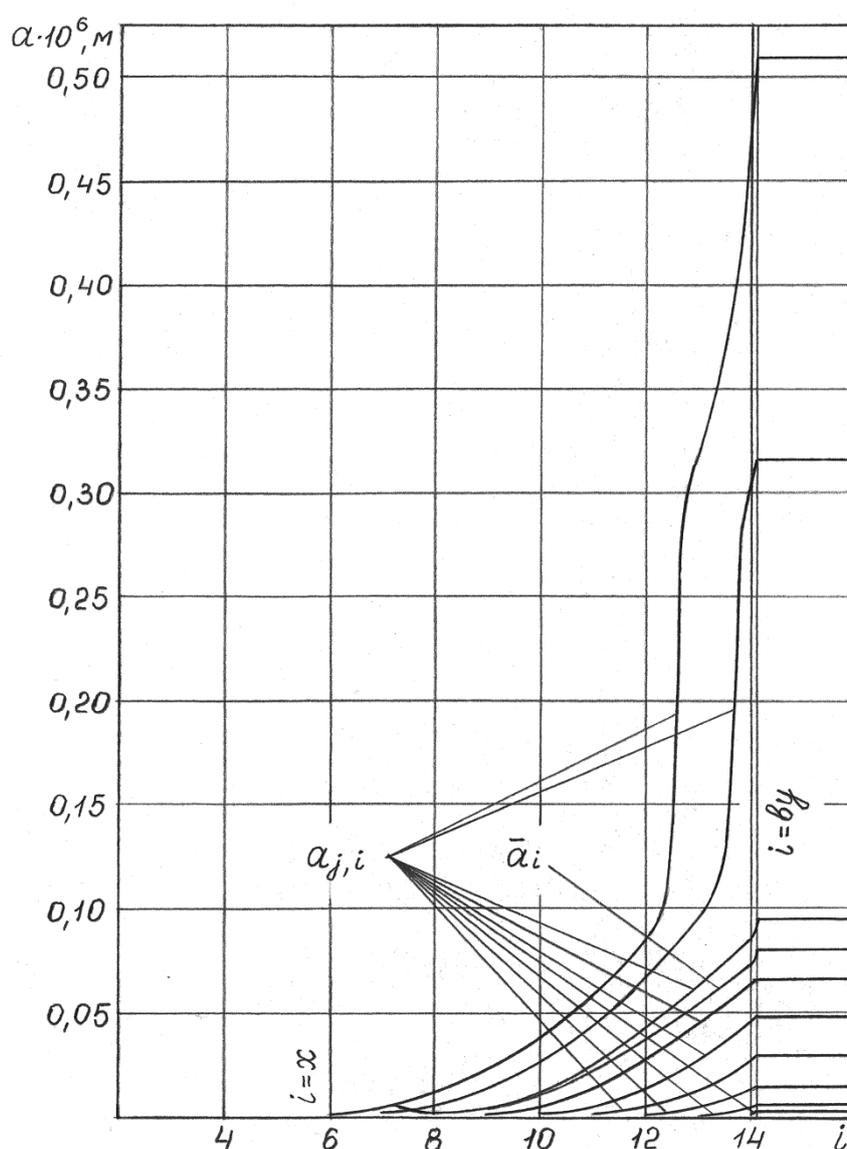
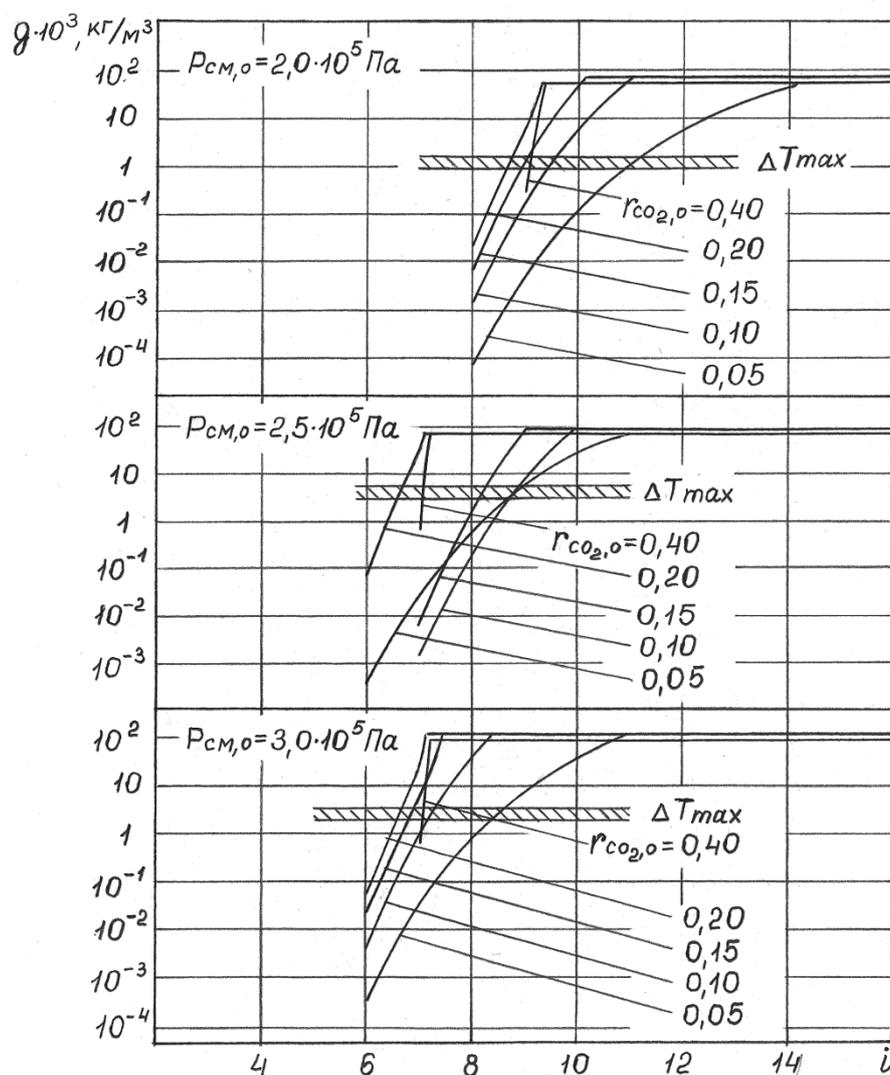


Рис. 2. Изменение параметра кристалла  $a$  вдоль проточной части центробежного турбодетандера ( $I$  – номер участка) при начальных параметрах  $P_{\text{см},0} = 2,0 \cdot 10^5$  Па;  $r_{\text{co}2,0} = 0,05$

Средний размер получаемых кристаллов  $\bar{a}$  будет наиболее близок к размеру кристаллов, образовавшихся на участке  $i = 8$ , т.к. на этом участке образуется наибольшее количество кристаллов (около 60 %). Взаимосвязь роста размеров кристаллов и роста их удельной массы отражена в математической модели анализируемого процесса [3]. Наибольшего размера достигают кристаллы, образовавшиеся в самом начале процесса кристаллизации (при достижении потоком первого критического переохлаждения), но количество таких кристаллов ничтожно мало (на 13 порядков меньше, чем кристаллов, образовавшихся на участке  $i = 8$ ).

Теперь рассмотрим процесс кристаллообразования при расширении газовых смесей с различными начальными концентрациями паров диоксида углерода и различными начальными давлениями газовой смеси [4].

На характер изменения удельной массы всех образующихся кристаллов по мере их роста (рис. 3) основное влияние оказывает стартовая масса кристаллов, т.е. масса зародышей, образующихся при втором критическом переохлаждении потока, которая пропорциональна скорости их образования, и которая будет тем больше, чем выше концентрация паров диоксида углерода в газовой смеси [9]. Именно эта тенденция оказывает решающее влияние на величину максимального переохлаждения потока  $\Delta T_{max}$  и его месторасположение [4], т.к. резкое повышение температуры потока вследствие подвода к нему теплоты фазового перехода, вызывающее снижение степени переохлаждения, зависит от величины массы растущих кристаллов.



**Рис. 3.** Изменение суммарной удельной массы  $g$  вдоль проточной части центробежного турбодетандера ( $i$  – номер участка) при различных начальных параметрах газовой смеси  $P_{см,0}$ ;  $r_{CO_2,0}$  (заштрихованный участок – зона Вильсона)

Наступление этого момента (вход потока в зону Вильсона, т.е. в зону, где разность между равновесной и текущей концентрацией диоксида углерода достигает максимума [10]) происходит тогда, когда удельная масса кристаллов достигает величины  $1 \dots 8 \text{ г/м}^3$  (рис. 3). Величина максимальной степени переохлаждения  $\Delta T_{\max} = 11,4 \dots 19,6 \text{ К}$  [4], причем более высокие значения этой величины соответствуют более низкой начальной концентрации паров диоксида углерода в газовой смеси. Можно сделать вывод и о том, что, если до зоны Вильсона рост массы кристаллов зависит от степени переохлаждения потока, то затем наблюдается обратная зависимость, т.е. дальнейший рост массы вызывает снижение переохлаждения (зоной Вильсона считается зона, где разность между равновесной и текущей концентрациями диоксида углерода достигает максимума).

Увеличение удельной массы кристаллов зависит и от характера роста их размера (рис. 4), т.к. приращение массы на любом из рассматриваемых участков будет зависеть от размера кристаллов на предшествующем участке [3], т.е. рост размера будет первичен по отношению к росту массы. При одинаковом параметре кристаллов-зародышей, например  $a = 2a_m$ , более высокая начальная концентрация паров диоксида углерода способствует образованию большей массы кристаллов, поэтому, даже при одинаковом приросте массы на последующем участке, общая масса кристаллов на нем, а следовательно, и выросший размер кристаллов, будут также тем больше, чем выше концентрация диоксида углерода. Это приводит к тому, что и следующее приращение массы будет следовать той же тенденции. Вышеперечисленные зависимости находят свое отражение в характере наклона кривых на рис. 3 и 4.

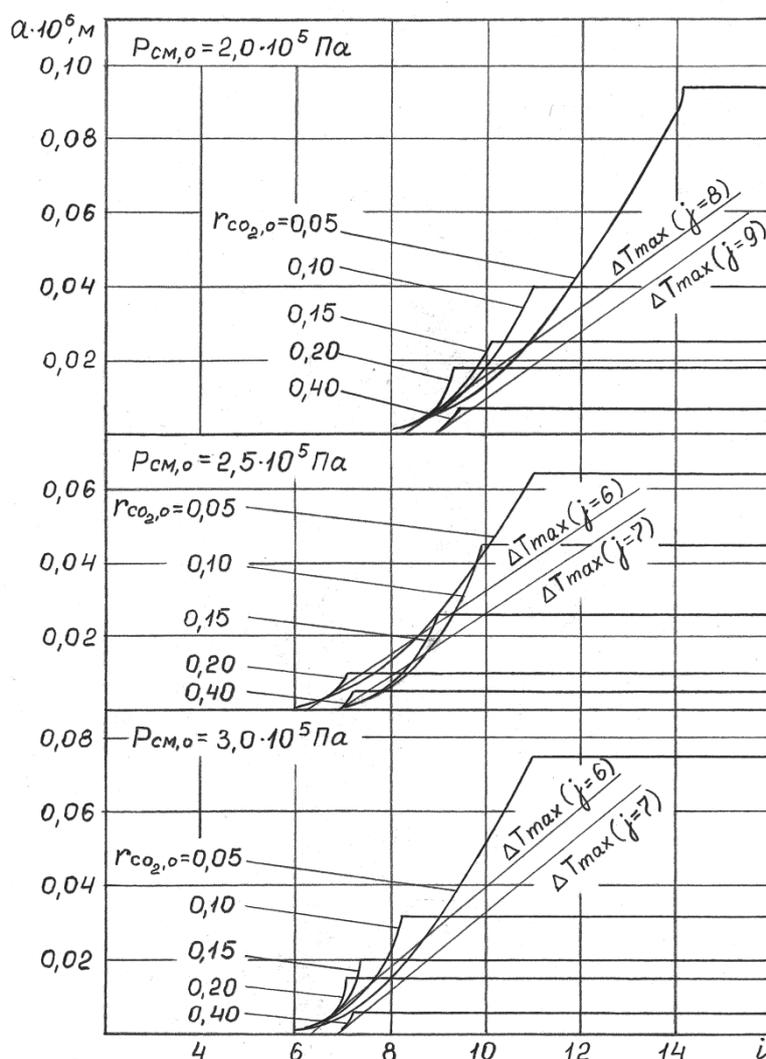


Рис. 4. Изменение параметра кристалла  $a$  основной массы кристаллов вдоль проточной части центростремительного турбодетандера ( $i$  – номер участка,  $j$  – участок зарождения) при различных начальных параметрах газовой смеси  $P_{cm,0}$ ;  $r_{CO_2,0}$

Проведенные на рис. 4 линии Вильсона соединяют точки, соответствующие размеру кристаллов в момент достижения потоком максимального переохлаждения для газовых смесей с различной начальной концентрацией паров диоксида углерода с учетом места зарождения этих кристаллов. Размеры кристаллов в зоне Вильсона – от  $0,002 \cdot 10^{-6}$  м для высоких концентраций паров диоксида углерода до  $0,032 \cdot 10^{-6}$  м для низких концентраций. Если сравнить эти величины с конечными размерами кристаллов, то можно сделать вывод о том, что основной рост кристаллов происходит уже за зоной Вильсона, т.е. в период резкого снижения переохлаждения потока.

### Список литературы

1. *Варенков С.В.* Турбодетандер газовой холодильной машины, работающий с вымораживанием диоксида углерода в проточной части: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Л., 1983. 216 с.
2. *Галдин В.Д.* Разработка элементов теории и анализ процессов расширения парогазовой смеси в турбодетандере: Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. – Омск, 1998. 410 с.
3. *Данилов М.М.* Моделирование процесса вымораживания диоксида углерода в объеме расширяющегося газового потока // Известия СПбГУНиПТ. 2007. № 1. С. 6 – 8.
4. *Данилов М.М.* Вымораживание диоксида углерода из газовых смесей в проточной части низкотемпературных турбодетандеров // Известия СПбГУНиПТ. 2009. № 3/4. С. 10 – 13.
5. *Данилов М.М., Смирнов А.С.* Основные особенности образования твердой фазы диоксида углерода // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 37 – 40.
6. *Пименова Т.Ф.* Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. – М.: Пищ. пром-сть, 1982. 208 с.
7. *Данилов М.М.* Скорость образования центров кристаллизации при вымораживании диоксида углерода // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 1. С. 21 – 23.
8. *Данилов М.М.* Рост кристаллов диоксида углерода в объеме расширяющегося газового потока // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 1. С. 18 – 20.
9. *Данилов М.М., Смирнов А.С.* Анализ влияния параметров газовой смеси на скорость кристаллообразования при вымораживании диоксида углерода // Современные проблемы холодильной техники и технологий: Сб. тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф. – Одесса, 2013. С. 64 – 65.
10. *Галдин В.Д., Терентьев Ю.Д.* Особенности процесса расширения дымовых газов в турбодетандере // Сб. науч. тр. – Владивосток, 1995, Вып. 6. С. 133 – 136.

*Статья поступила в редакцию 09.02.2016г.*