

## ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ КРИОГЕННОЙ ИНДУСТРИИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ И СПГ

© Л. Г. Лунькова<sup>1</sup>✉, А. Н. Гульков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,  
Владивосток, Российская Федерация  
✉lunkova.lg@dvfu.ru

**Ключевые слова:** криогенная отрасль; ожижение газов; сжиженный природный газ; холодильная установка.

**Аннотация:** Представлено описание этапов развития криогенной отрасли: от первых предположений философов и ученых о возможности перевода газов в жидкое состояние до современных возможностей производства, хранения, транспортировки и использования криогенных жидкостей, в том числе сжиженного природного газа. Приведена информация об основных достижениях и открытиях в области низких температур, служивших катализатором дальнейшего развития техники и технологий получения криогенных продуктов.

### Введение

Как зарождалась идея перевода газов в жидкое состояние, откуда возникла мысль о существовании «абсолютного нуля» и как человечество внедрило в свою повседневную жизнь криогенику?

Криогенная отрасль существует официально с XIX века, однако сфера производства и использования сжиженного природного газа (СПГ) начала активно развиваться в середине XX века и за это время претерпела значительные изменения. Это связано с недостаточной научной базой того времени и отсутствием понимания всех преимуществ применения криогенных жидкостей после их первого получения. Основной упор был сделан на изучение свойств применительно к самим жидкостям и изучению влияния «холода» от этих сжиженных газов на различные объекты и вещества.

Ценность природного газа и метана, как его основного компонента, была обозначена еще в древние времена, и применялся он повсеместно во многих сферах жизни человека. Однако с тех пор, как была обнаружена способность сжижать метан, стало возможным его компактное хранение и транспортировка на очень большие расстояния.

Производство СПГ, как и других криогенных жидкостей, требует высокой технологии, включая сжижение (системы хранения и транспортировки), а также применение специального оборудования для его регазификации с целью последующего использования, которое совершенствуется и в наши дни.

## Открытия в области сжижения газов

Ученые (И. Ламберт, А. Лавуазье) отмечали, что при охлаждении вещества переходят из одной фазы в другую. Экспериментальное доказательство данной теории случайно получил голландский физик М. Ван-Марум (1750 – 1837 гг.) при исследовании сжатия аммиака – он стал первым ожиженным газом, а в 1780 г. Г. Монж и Л. Клуэ ожижили (специально)  $\text{SO}_2$ .

Фарадей изучал влияние нагрева на хлоридрат и обнаружил капли на стенках колбы после эксперимента, которые образовались в результате повышения давления и конденсации паров хлора. Хлор был третьим газом, который удалось ожижить в 1823 г. после  $\text{SO}_2$  и аммиака. Тогда Фарадей понял, что тем же путем можно ожижить и другие газы, такие как сероводород, монооксид азота, циан, диоксид углерода и т.д.

Однако некоторые газы не поддавались ожижению, и ученые назвали их «постоянными» (водород, азот, кислород, диоксид азота, оксид углерода и метан). При любом давлении и температуре до минус  $110^\circ\text{C}$  они не поддавались этому процессу, что не давало покоя Фарадею, который предполагал возможность получения еще более низкой температуры.

Французский ученый и инженер С. Карно заложил основы для решения этой задачи. В 1824 году он разработал холодильную машину, функционирующую по циклу, названному его именем. Эта идеальная машина предназначена для отвода тепла от объекта, температура которого ниже температуры окружающей среды [1].

Каждая холодильная или криогенная установка в современности работает на тех же принципах, на которых основан цикл Карно. Данный цикл позволил установить абсолютную температурную шкалу.

В 1861 году Д. И. Менделеевым введено понятие о температуре «абсолютного кипения», а в 1862 г. Т. Эндрюс предложил термин «критическая температура». С введением реперных температурных уровней, появлением терминологии значительно упростилось понимание процессов фазового перехода.

Однако вопрос о наибольшей и наименьшей существующей температуре не оставлял умы великих ученых того времени. Работами С. Карно, В. Кельвина и Р. Клазиуса было установлено, что абсолютный нуль температур минус  $273,15^\circ\text{C}$ . Официально такая шкала была установлена только спустя более 100 лет после выхода статьи Томсона–Кельвина (1849 г.) в 1954 г. [1]

Для получения столь низких температур было недостаточно той базы и методов сжижения газов, чтобы хотя бы приблизиться к этому значению. В ходе поиска ответа на вопрос о технической возможности охлаждения газов были выдвинуты теории о возможном снижении температуры газа (жидкости) в процессе его расширения. Благодаря исследованиям Гей-Люссака и Пуссана доказано, что при расширении газа снижение температуры может быть очень существенным. Однако машину, работающую по этому принципу (детандер, от *фран.* Detender – расширять), удалось создать лишь спустя несколько десятилетий.

Другое устройство – дроссель – создали на базе экспериментов Джоуля и Томпсона в 1852 году. Дросселирование основывается на расшире-

нии газа (или жидкости) без производства внешней работы. Газ под высоким давлением проходит через узкий канал/проход в вентиле с большим гидравлическим сопротивлением. Температура газа понижается, общая его энергия не изменяется, а перераспределяется – убыль кинетической и рост потенциальной. Это явление – эффект Джоуля–Томпсона, на котором основана работа каждой холодильной установки в современном мире, было признано открытием официально в 1869 г. До 1895 года данный эффект не был апробирован на установках по получению жидких газов.

В 1877 году Л. Кайете – горный инженер из Шатильона на Сене – первым получил жидкий кислород (в «динамическом состоянии»). Впоследствии он провел еще ряд экспериментов с азотом и СО, а также впервые ожижил газовую смесь, что положило начало созданию новых рабочих тел – смесевых хладагентов, которые обладают наилучшей эффективностью в процессах получения холода с минимальными энергозатратами.

Результаты Пикте и Кайете дали понять, что ожижение «постоянных газов» возможно, однако необходимо было удерживать их в стабильном жидком состоянии в количестве, достаточном для изучения их свойств, то есть нужен был специальный сосуд. Задачу решили два польских профессора Зигмунд Вроблевский и Кароль Ольшевский из Краковского университета. Им удалось ожижить кислород и «сохранить» его в «статическом состоянии» в 1883 году. Позднее они ожижили азот, воздух, СО и новый в то время газ – аргон, который обнаружили в воздухе английские физики Дж. Рэлей и В. Рамзай в 1894 г. [1].

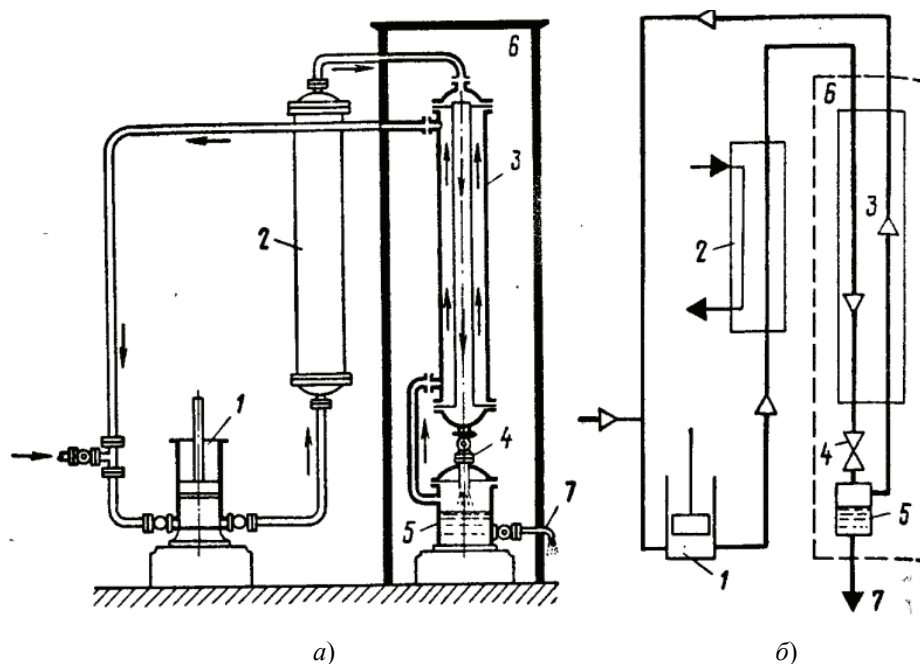
В 1890-х годах была создана фирма под руководством профессора К. Ольшевского, выпускавшая ожижители кислорода, азота и воздуха. Ольшевский также получил первый жидкий водород в виде тумана (в «динамическом состоянии») в 1884 г.

Позднее в 1898 г. – первый жидкий водород в «статическом состоянии» получил англичанин Д. Дьюар и «сохранил» его в сосуде. В этот же год это удалось и К. Ольшевскому, но позднее.

В 1895 году К. Линде создал первую холодильную установку, работающую по одноименному циклу Линде, способную производить жидкий воздух в промышленных масштабах (рис. 1). Здесь использовался как раз эффект Джоуля–Томпсона, впервые реализованный в рамках работы холодильной машины [2].

Все достижения теории и практики 1895–1896 гг., связанные с циклом Линде и его модификациями, не могли снять задачу ожижения водорода. Английский физик Джеймс Дьюар все же добился успеха в 1898 г. после создания необходимых условий для решения этой задачи.

Во-первых, разработан и внедрен дроссельный газожидкостной цикл Линде. Во-вторых, благодаря исследованиям французского ученого Д'Арсонваля, немецкого ученого Вайнхольда и самого Дьюара создана новая вакуумная теплоизоляция, которая значительно уменьшила теплопритоки извне к холодной части установки для сжижения. Благодаря такой вакуумной изоляции и использованию активированного угля (предложение Дьюара) создан известный сосуд Дьюара, который в настоящее время применяется в каждой лаборатории и на каждом промышленном производстве криогенных продуктов, включая СПГ.



**Рис. 1. Схема первой установки Линде для ожижения воздуха:**

*а* – конструкция; *б* – схема; 1 – компрессор; 2 – водяной холодильник; 3 – теплообменник; 4 – дроссель; 5 – отделитель жидкости; 6 – кожух с тепловой изоляцией; 7 – слив жидкого воздуха

Ученые К. Линде (Германия) и Ж. Клод (Франция) примерно в одно и то же время создали два фундаментальных цикла с важным отличием: способ расширения рабочего газа по циклу Линде – дросселирование, а Ж. Клод сделал ставку на расширение газа в детандере.

В 1902 году К. Линде была разработана установка разделения воздуха и запущена первая кислородная станция [1]. Считается, что с этого началось развитие новой отрасли промышленности – разделение газовых смесей. Данное открытие сыграло значительную роль в СПГ индустрии, так как сжиженный природный газ – это, прежде всего, смесь, содержащая в том числе нежелательные компоненты, мешающие работе установок сжижения. Так, необходимо удалять  $\text{CO}_2$  из природного газа перед сжижением – он замерзает в трубках теплообменников и закупоривает пространство по ходу газа, что может привести к поломке оборудования или даже аварии на производстве. Низкокипящие газы, такие как азот и кислород, тоже необходимо удалять, так как «заазочивание» установок также приводит к возможному выходу из строя оборудования.

В этом же 1902 году французский ученый Ж. Клод изобрел детандер, с помощью которого можно было также получить жидкий воздух. Установка сжижения газов работала на одноименном цикле Клода.

Два цикла – Клода и Линде – до сих пор фундаментально незаменимы, и все существующие технологии получения СПГ и других жидкостей из газов работают на принципах, сформированных этими учеными. Установки лишь совершенствуются, модифицируются в целях повышения КПД циклов.

Гейке Камерлинг-Оннес (1853 – 1926 гг.) получил жидкий водород в 1906 году в промышленных масштабах, благодаря чему в 1908 году был получен первый жидкий гелий. Ожижение гелия способствовало открытию в 1911 г. сверхпроводимости [1]. Гейке Камерлинг-Оннес в своих экспериментах смог достичь температуры 0,83 К и выдвинул две теории: либо необходимо придумать новый способ охлаждения, принципиально отличающийся от существующих, либо найти вещество с еще более низкой температурой кипения, чем у гелий.

В 1926 году изобретен новый способ охлаждения двумя независимо работающими учеными: канадцем У. Джиоком и ученым из Швейцарии П. Дебайем. Они являются первооткрывателями магнитокалорического эффекта, который основан на охлаждении рабочего газа посредством намагничивания и размагничивания магнетика. Первая магнитная криогенная установка была запущена лишь в 1933 году Джиоком в Калифорнийском университете, принцип которой основан на размагничивании сульфата гадолиния. Получена температура 0,25 К – и это был абсолютный рекорд [1]. Однако ввиду того, что магниты не выдерживали низких температур длительно, применение данного способа было невозможно до XXI в. в принципе [3].

В процессах сжижения природного газа используются до сих пор два основных цикла – Клода и Линде. Однако был совершен ряд открытий, которые способствовали техническому прорыву в области создания криогенных установок [4].

Внедрение существующих регенераторов для низкотемпературного разделения воздуха вместо стандартных теплообменников стало первым открытием. Вместо прямого теплообмена сжатого воздуха с холодными газами, регенераторы сначала нагревают стенки, используя тепло выходящих холодных газов (кислорода и азота). Затем нагретый теплоноситель (стенки регенератора) охлаждает поступающий сжатый воздух, возвращая тепло процессу. Френкель М. модернизировал аппарат-регенератор путем замены громоздких кирпичей на гофрированную алюминиевую ленту, а каменный короб – стальным цилиндром. Компания Линде купила патент Френкеля и усовершенствовала изобретение, после чего реализовала аппарат в реальности. Данный регенератор мог работать не только для теплообмена, но и как аппарат для удаления CO<sub>2</sub> и воды. Это был технологический прорыв в криогенном машиностроении.

Второе значительное усовершенствование холодильных машин – внедрение турбодетандеров в цикл. В 1930-х гг. немецкой фирме «Сюрт» удалось по заказу Линде сделать первый надежный турбодетандер. Однако его КПД был на уровне 0,52...0,58.

Советский физик, инженер и новатор П. Л. Капица решил задачу путем перехода на другой принцип работы турбодетандеров, и в 1938 году был создан турбодетандер с КПД 0,8 [1]. Изобретением турбодетандера с высоким КПД П. Л. Капица не ограничился и в этом же году создал установку сжижения воздуха, работающую по циклу, принципиально отличающемуся от цикла Клода – турбодетандеру не нужно было высокое давление рабочего газа, он мог работать на уровне 0,6...0,7 МПа.

При сжижении природного газа используются столь же низкие температуры и те же процессы, какие применяются в индустрии технических газов, в связи с чем становление СПГ-индустрии стало возможным благодаря вышеописанным открытиям и достижениям в области криогенных температур.

### Становление СПГ-индустрии

В 1830 году Майкл Фарадей впервые получил жидкий метан (основной элемент СПГ) в нестабильном состоянии, однако первый завод, где получен СПГ, был построен в 1917 году (Западная Вирджиния, США). Его главная цель – извлечение гелия из природного газа. Сжиженный природный газ – это лишь побочным продуктом [2].

В 1941 году в Кливленде (штат Огайо, США) впервые налажено масштабное производство СПГ (30 тыс. т в год), цель которого – создание резервных запасов для покрытия пиковых нагрузок газопотребления.

Период с 1914 по 1955 гг. ознаменован рождением инженерных решений в области коммерческих перевозок, использования и хранения СПГ. В 1942 году впервые осуществлен перевод первых грузовиков (грузоподъемность – 1 т) и автобусов на СПГ (Великобритания), но из-за отсутствия в стране источника производства СПГ данный проект закрыли.

В 1944 году произошла первая и самая серьезная до настоящего времени катастрофа, унесшая 128 жизней (рис. 2). Основной причиной катастрофы послужил неправильный выбор металла для танков [5]. Эта авария приостановила развитие индустрии СПГ, однако послужила катализатором для создания норм безопасности, которые с тех пор сделали ее одной из самых безопасных отраслей энергетики.

В 1953 году построен первый в России мини-завод СПГ в п. Развилка. В 1954 году получен жидкий метан, освоена схема его производства, слива в хранилища и регазификации с возвратом в газопровод «Саратов – Москва» [6].

В 1951 году начато строительство барж для перевозки СПГ (Чикаго). Построен первый метановоз вместимостью 5 тыс. м<sup>3</sup>. В 1959 году осуществлена первая поставка СПГ из США в Великобританию на модифицированном танкере времен Второй мировой войны. В этом же году газ был поставлен из США в Японию.

1964 год – построен завод в г. Арзев (Алжир, 1,5 млрд м<sup>3</sup>/год); начались регулярные перевозки танкерами; стал работать первый терминал по регазификации во Франции.

1969 год – начало долгосрочных поставок из США (с завода в городе Кенай на Аляске) в Японию – соглашения действуют более 40 лет.

1989 год – опытный российский самолет ТУ-155, один из моторов которого работал на СПГ, поднялся в воздух. Этот и последующие полеты показали реальную перспективу использования в авиации метана [7].

С 1953 года, когда был построен первый мини-завод по производству СПГ, до 2009 года в России не было технологий для строительства крупнотоннажных комплексов СПГ, строились только мини-установки, работающие по модифицированным циклам Клода, Линде и Капицы, применение которых в чистом виде не было экономически обосновано на крупных заводах.



Рис. 2. Снимок последствий аварии на заводе СПГ в Кливленде

Только в 2009 году был запущен первый в России крупнотоннажный завод СПГ в порту Пригородное (Корсаков, Сахалинская область, проект «Сахалин-2») по иностранной технологии DMR (цикл двойного смешанного хладагента) [2].

XX век принято считать периодом становления СПГ-индустрии, которая начала активно развиваться после главного научного достижения – ожижения гелия. Все фундаментальные открытия этого времени способствовали активному развитию рынка криогенных жидкостей, главным образом СПГ, как экологически чистого вида топлива для автомобильного, железнодорожного, морского транспорта. Индустрия сжиженного природного газа претерпела значительные изменения с момента своего возникновения. Сегодня она играет ключевую роль в глобальной энергетической системе, способствуя переходу к более устойчивым и чистым источникам энергии. Понимание этой отрасли является критически важным для будущего энергетической безопасности и устойчивого развития. С тех пор, как была открыта возможность сжижать природный газ, произошли значительные научные и технологические достижения, которые сделали СПГ важной частью глобальной энергетической системы.

Применение СПГ как экологичного и экономически эффективного источника получения энергии сейчас широко. Сжиженный природный газ используют в качестве источника для автономной газификации удаленных населенных пунктов для бытовых нужд населения и автономной выработ-

ки энергии на промышленных предприятиях, в качестве газомоторного топлива (автотранспорт, морской и железнодорожный транспорт), а также в космической отрасли (как компонент ракетного топлива).

Интерес к устойчивым и экологически чистым источникам энергии только усиливает актуальность и значение данной сферы. Специалисты продолжают разрабатывать инновационные технологии для улучшения процессов сжижения, хранения и транспортировки, что делает индустрию СПГ готовой к новым вызовам и возможностям.

Сжиженный природный газ стал важной частью международной торговли энергоресурсами, позволяя странам-добытчикам экспортировать газ на новые рынки, в том числе в регионы, которые не имеют доступа к трубопроводной сети.

#### *Список литературы*

1. Бродянский, В. М. От твердой воды до жидкого гелия (история холода) / В. М. Бродянский. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 336 с.
2. Федорова, Е. Б. Становление мировой индустрии СПГ / Е. Б. Федорова // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 2(20). – С. 74–79.
3. Лунькова, Л. Г. Технология магнитного охлаждения – технология будущего / Л. Г. Лунькова, Г. С. Мельников, А. Н. Гульков // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сб. науч. ст. по итогам второй Междунар. науч. конф., Казань, 28–29 февраля 2020 г. – 2020. – Ч. 1. – С. 124–126.
4. Аксенчик, К. В. Эволюция и перспективы энерго-и ресурсосберегающих подходов в технологии аммиака / К. В. Аксенчик // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 4–21.
5. Смирнова, В. В. Анализ аварий типового комплекса сжиженного природного газа / В. В. Смирнова // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы : тезисы докладов II Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2023. – С. 69–74.
6. АО «МГПЗ» : офиц. сайт [Электронный ресурс]. – URL : <https://mgpz.ru/about/> (дата обращения: 16.12.2024/)
7. СПГ в России. Путь производственных мощностей / А. Б. Карпов, И. В. Мещерин, А. М. Козлов, К. Г. Бутырская // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 4(100). – С. 178–185.

#### *References*

1. Brodyansky V.M. *Ot tverдой vody do zhidkogo geliya (istoriya kholoda)* [From solid water to liquid helium (history of cold)], Moscow: Energoatomizdat, 1995, 336 p. (In Russ.)
2. Fedorova E.B. [Formation of the global LNG industry], *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative fuel transport], 2011, no. 2(20), pp. 74-79. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Lunkova L.G., Melnikov G.S., Gulkov A.N. *Prioritetnyye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: sb. nauch. st. po itogam vtoroy Mezhdunar. nauch. konf.*, [Priority areas of innovation in industry: Coll. sci. art. based on the results of the second Int. sci. conf.], Kazan', 28-29 February 2020, part 1, pp. 124-126. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Aksenchik K.V. [Evolution and prospects of energy- and resource-saving approaches in ammonia technology], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology], 2021, vol. 64, no. 1, pp. 4-21. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Smirnova V.V. [Analysis of accidents at a typical liquefied natural gas complex], *Szhizhennyy prirodnyy gaz: problemy i perspektivy: tezisy dokladov II Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Liquefied natural gas: problems and prospects], Moscow, 2023, pp. 69-74. (In Russ., abstract in Eng.)

6. available at: <https://mgpz.ru/about/> (accessed 16 December 2024).

7. Karpov A.B. Meshcherin I.V., Kozlov A.M., Butyrskaya K.G. [LNG in Russia. The path of production capacities], *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU* [Business magazine Neftegaz.RU], 2020, no. 4(100), pp. 178-185. (In Russ., abstract in Eng.)

---

## Stages of Formation of the Cryogenic Industry of Liquefied Gases and LNG

© L. G. Lunkova<sup>1</sup>✉, A. N. Gulkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉lunkova.lg@dvfu.ru

**Keywords:** cryogenic industry; gas liquefaction; liquefied natural gas; refrigeration unit.

**Abstract:** The development stages of the cryogenic industry - from the first assumptions of philosophers and scientists about the possibility of converting gases into liquid state to modern production, storage, transportation, and use capabilities of cryogenic liquids, including liquefied natural gas – is described. Information is provided on the main achievements and discoveries in the field of low temperatures that served as catalysts for further development of equipment and technologies for obtaining cryogenic products.

---

### *Сведения об авторах*

**Лунькова Лилия Геннадьевна** – аспирант департамента энергетических систем, ФГБОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0009-0009-9760-8699; e-mail: lunkova.lg@dvfu.ru

**Гульков Александр Нефедович** – доктор технических наук, профессор, профессор департамента нефтегазового дела и нефтехимии, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-5207-7921; e-mail: gulkov.an@dvfu.ru

### *About the author*

**Liliya G. Lunkova** – Postgraduate Student of the Department of Energy Systems, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0009-0009-9760-8699; e-mail: lunkova.lg@dvfu.ru

**Alexander N. Gulkov** – D. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Oil and Gas and Petrochemistry, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; ORCID 0000-0001-5207-7921; e-mail: gulkov.an@dvfu.ru



© Лунькова Л. Г., Гульков А. Н., 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>