

**В.А. Седнин,**  
д.т.н., проф., зав. кафедрой «Промышленная  
теплоэнергетика и теплотехника» БНТУ

**А.А. Абрамовский,**  
м.т.н., зав. кафедрой «Газоснабжение и местные виды  
топлива» ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ»

# ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ИНТЕГРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА И МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

## Аннотация

В статье представлены организационно-методические и технические решения построения энергетического интеграционного комплекса в составе предприятия мясоперерабатывающей отрасли агропромышленного комплекса и компрессорной станции магистрального газопровода. Такого рода сопряжение позволяет минимизировать энергетическую составляющую себестоимости выпускаемой продукции агропромышленного предприятия за счет утилизации энергетических отходов компрессорной станции магистрального газопровода.

## Abstract

The article presents organizational, methodological and technical solutions for the construction of the energy integration complex as part of the meat processing industry of the agro-industrial complex and the compressor station of the main gas pipeline. This kind of coupling allows to minimize the energetic component of the cost of production of the agro-industrial enterprise due to the utilization of energy waste of the compressor station of the main gas pipeline.

## Введение

Традиционная методическая основа энергосбережения отличается дискретностью анализа и является непригодной для выявления предельно полного потенциала энергосбережения в сложных энерготехнологических системах и комплексах. Для достижения максимального энергосберегающего потенциала следует расширять границы систем, вовлекаемых в процесс рационализации энергоиспользования. Предпосылкой радикального сдвига в решении проблемы энергосбережения является внедрение методической основы, базирующейся на системном подходе.

Применительно к теплотехнологическим системам промышленных предприятий разработана концепция интенсивного энергосбережения, предусматривающая решение целого комплекса задач [1, 2]. Главными особенностями указанной концепции является то, что объектом энергетического анализа выступают отраслевые технологические комплексы материального производства, которые могут сформировать базу поиска крупномасштабного энергосберегающего эффекта, а средством поиска этого

эффекта выступает совокупность технологических, технических и энергетических мероприятий.

К настоящему моменту в республике имеются несколько успешных примеров реализации принципов концепции интенсивного энергосбережения путем создания интеграционных энерготехнологических систем и комплексов на базе организаций различного профиля деятельности. Теоретические основы сопряжения промышленных теплотехнологических комплексов на примере предприятий строительных материалов с энергосистемой страны представлены в работах [3, 4], где определены конкретные технические, схемные и режимные решения применения комбинированных энергетических установок на предприятиях отрасли, а также предложена возможность использования когенерационных комплексов асфальтобетонных заводов для регулирования генерации электроэнергии в соответствии с графиком электрической нагрузки энергосистемы. Методические подходы и технические решения использования побочных низкотемпературных тепловых энергоресурсов в системах

теплоснабжения предприятий и промышленных узлов путем применения абсорбционных тепловых насосов в теплоэнергетических системах рассмотрены в [5].

Разработанные в [1, 2] принципы положены в основу решения задач «бестопленного» энергоснабжения предприятия агропромышленного комплекса (АПК) [6–11] на примере сопряжения предприятия мясоперерабатывающей отрасли с теплоэнергетической системой компрессорной станции магистрального газопровода (КС МГ). Актуальность этих технических решений определяется переходом АПК Республики Беларусь на интенсивный путь развития, что в свою очередь обусловлено ориентацией на потребности перерабатывающей промышленности и спрос на мировом рынке продовольствия. Ключевым фактором, обеспечивающим повышение конкурентоспособности сельскохозяйственного производства, является создание высокоэффективных интеграционных структур корпоративного типа по технологическим продуктовым цепочкам от производства исходного сырья до сбыта готовой продукции [12]. В области производства мясных продуктов это реа-

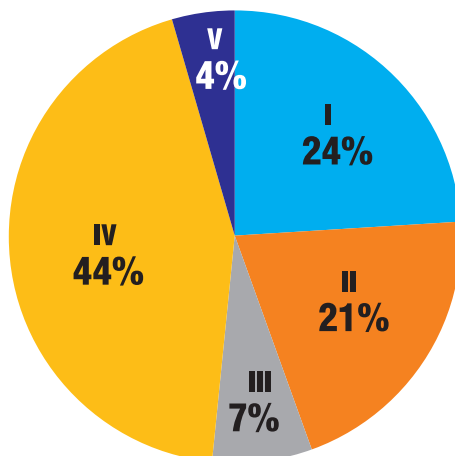
лизуется путем создания вертикально-интегрированных организаций с полным замкнутым циклом производства: от выращивания зерновых и изготовления комбикормов до производства и реализации мясной продукции. Подобного рода объекты выступают потребителем значительного объема топливно-энергетических ресурсов, а их энергетическая функция находится в тренде развития промышленных теплотехнологий.

### Основная часть

Реализуемые в настоящее время в отрасли мероприятия предполагают повышение эффективности энерготехнологических систем предприятий путем уменьшения доли энергетических отходов без изменения принципиальных основ технологии и типа применяемого оборудования, а потенциал мероприятий ограничен возможностями энерготехнологической системы предприятия. Расширение границ возможностей повышения энергоэффективности может быть достигнуто построением энергетических интеграционных комплексов в составе объекта энергопотребления и внешнего источника энергетических отходов (вторичных энергоресурсов). В качестве источника энергетических отходов, как было отмечено выше, были выбраны КС МГ с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами (ГПА), а в качестве объекта энергопотребления – мясоперерабатывающее предприятие (МПП). Такой выбор обусловлен корреляцией объектов по территориальному признаку (расположением сельскохозяйственных потребителей в пределах радиуса экономически целесообразного транспортирования энергии) и существующими тенденциями развития мясной отрасли республики АПК.

На основе исследования структуры и состава ВЭР теплоэнергетических КС МГ нами были синтезированы и оптимизированы новые регенеративно-утилизационные схемы комбинированных энерготехнологических установок (КЭТУ) [6–8]: КЭТУ с детандер-генераторным агрегатом (ДГА); КЭТУ с традиционной паросиловой установкой с водой в качестве рабочего тела (ПСУ) и КЭТУ с паросиловой установкой с органическим рабочим телом (ОРЦ). Выполненный численный анализ по фактическим эксплуатационным данным для КС МГ «Ямал-Европа», расположенных на территории Республики Беларусь, позволил констатировать, что при средней потребляемой мощности КС в течение года 54 МВт (загрузка трех одновременно работающих ГПА) установленная электрическая мощность и отпуск электроэнергии в течение года для КЭТУ с ПСУ составляет 9,9 МВт и 65,8 ГВт·ч, для КЭТУ с ОРЦ – соответственно 6 МВт и 39,9 ГВт·ч и для КЭТУ с ДГА – соответственно 0,9 МВт и 5,99 ГВт·ч. Исходя из полученных резуль-

Рис. 1. Структура электропотребления мясоперерабатывающего предприятия



- I – мясо и субпродукты 1-й категории;
- II – колбасные изделия;
- III – полуфабрикаты;
- IV – производство холода;
- V – производство тепловой энергии.

татов, для построения энергетического интеграционного комплекса в составе предприятия мясоперерабатывающей отрасли и КС МГ и оценки потенциального энергосберегающего эффекта в качестве электрогенерирующей установки принималась КЭТУ с ПСУ как наиболее более экономически эффективная из исследованных [9].

По энергетическим характеристикам источника энергоснабжения определялась производительность объекта энергопотребления (МПП). Результаты анализа энерготехнологических схем предприятий мясоперерабатывающей отрасли, а также показатели потребления энергоресурсов и усредненные нормы расхода энергии по основным видам продукции типового мясоперерабатывающего предприятия представлены в [10, 11]. Для интегрированной структуры энергоснабжения ММП (рисунок 1) и усредненных норм расхода ТЭР на единицу продукции (мясо и субпродукты 1-й категории – 300 кВт·ч/т; колбасные изделия – 420 кВт·ч/т) при расположением объеме годовой выработки электроэнергии 65,8 ГВт·ч потенциальная производительность в год по мясу составит около 52,6 тыс. т, по колбасным изделиям – около 33 тыс. т. Полученная на основании статистической информации для мясоперерабатывающего предприятия с традиционной теплотехнологией производительность [13]

в несколько раз превышает производительность даже крупнейших мясоперерабатывающих предприятий республики. Кроме того, для энергоснабжения этого предприятия потребуется дополнительно наличие теплоисточника (котельной) мощностью около 130 тыс. Гкал в год.

Таким образом, целесообразно осуществить структурную оптимизацию энерготехнологической схемы мясоперерабатывающего предприятия с целью увеличения доли электроэнергии в энергобалансе предприятия. При этом в качестве дополнительного критерия эффективности выступает экономически обусловленный максимум потребления электроэнергии. В [14] представлены результаты сравнения варианта структуры теплоэнергетической системы предприятий мясоперерабатывающей отрасли с традиционной теплотехнологией с вариантами со структурами, модернизированными путем технического переоснащения только теплоисточника (замена газовых котлов на котлы электрические без изменений в технологическом процессе, вариант 1) и в том числе с принципиальными изменениями в основных теплотехнологических процессах (замена паровых аппаратов электрическими, вариант 2).

Указанная структурная модернизация энерготехнологической схемы мясоперерабатывающего предприятия позволяет увеличить долю потребления электроэнергии в обобщенных энергетических затратах до 100% и полностью отказаться от котельно-печного топлива. При этом годовая производительность предприятия по мясу и колбасным изделиям для первого варианта составила 16400 т/год и 10000 т/год; а для второго варианта – соответственно 19000 т/год

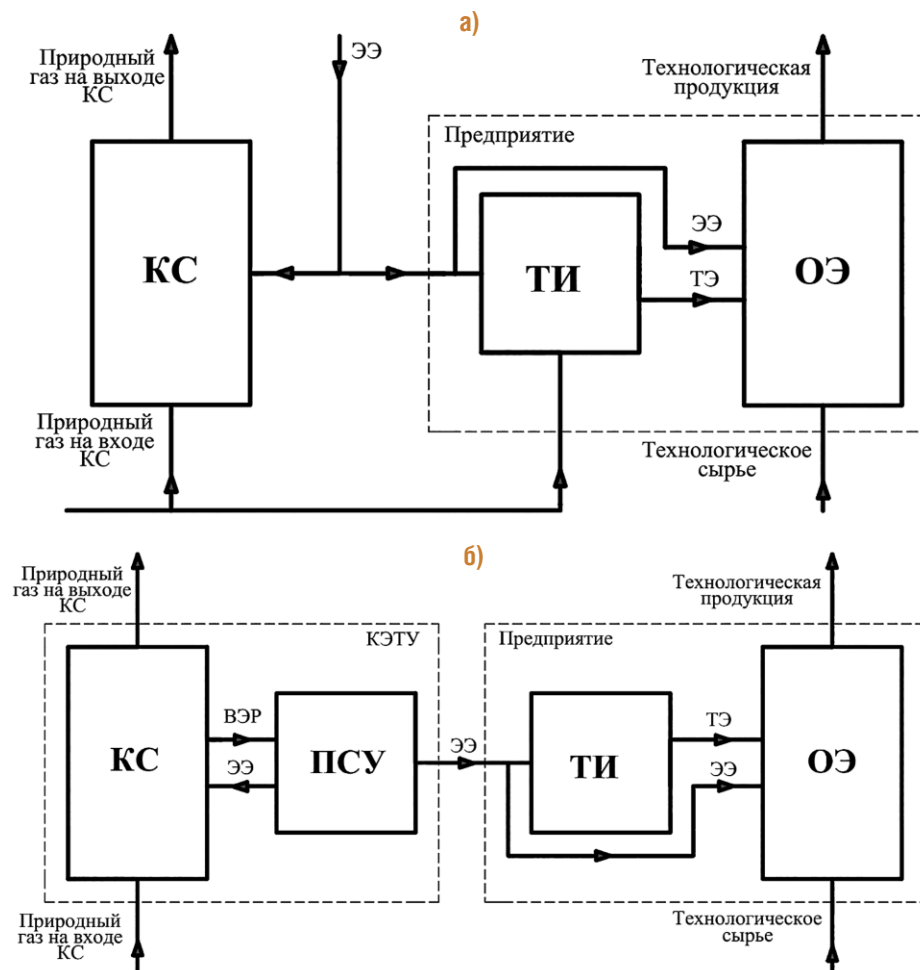
и 11600 т/год. Результаты исследования показывают перспективность применения более глубокой модернизации с увеличением объема использования электрической энергии. На рисунке 2 для сравнения приведены принципиальные схемы структуры энергоснабжения предприятия с традиционной теплотехнологической системой и структуры

энергопотребления интеграционного энерготехнологического комплекса. Первая схема (рисунок 2, а) отражает структуру раздельного энергоснабжения КС МГ и МПП от объединенной энергосистемы страны. Вторая схема (рисунок 2, б) синтезирована по принципам интенсивного энергосбережения с построением интеграционного ►

Указанная структурная модернизация энерготехнологической схемы мясоперерабатывающего предприятия позволяет увеличить долю потребления электроэнергии в обобщенных энергетических затратах до 100% и полностью отказаться от котельно-печного топлива.

**Рис. 2.** Варианты энергоснабжения КС МГ и МПП: а) принципиальная схема отдельного энергоснабжения; б) принципиальная схема интеграционного комплекса при модернизации теплоэнергетической системы МПП

КС – компрессорная станция; ПСУ – паросиловая установка; ТИ – локальный теплоисточник; ОЭ – объект энергообеспечения; ЭЭ – электроэнергия; ТЭ – тепловая энергия



комплекса в составе энергоутилизационной установки КС МГ и теплоэнергетической системы промышленного мясоперерабатывающего предприятия.

Для прогнозирования энергопотребления предприятия на основании номенклатурного перечня продукции и фактических норм потребления ТЭР на единицу продукции разработана методика с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях (НС-модели) [13, 15–17]. В методике учитывается, что в первую очередь на расходы энергетических ресурсов мясоперерабатывающего предприятия оказывают влияние следующие факторы: количество мяса (включая субпродукты 1-й категории), колбасных изделий, полуфабрикатов, консервов, сухих кормов и технических жиров, отнесенных к количеству перерабатываемого сырья, расход ТЭР на производство этих видов продукции, а также расход ТЭР на горячее водоснабжение, отопление и вентиляцию.

С учетом располагаемой статистической информации в качестве управляющих параметров НС-модели были приняты:  $X_1$  – количество производимого мяса свинины (включая субпродукты 1-й категории) за отчетный месяц, т/мес.;  $X_2$  – количество производимого мяса говядины (включая субпродукты 1-й категории) за отчетный месяц, т/мес.;  $X_3$  – количество производимых вареных колбасных изделий за отчетный месяц, т/мес.;  $X_4$  – количество производимых копченостей за отчетный месяц, т/мес.;  $X_5$  – количество производимых субпродуктов за отчетный месяц, т/мес.;  $X_6$  – удельный расход ТЭР на производство одной тонны мяса свинины (включая субпродукты 1-й категории), кВт·ч/т;  $X_7$  – удельный расход ТЭР на производство одной тонны мяса говядины (включая субпродукты 1-й категории), кВт·ч/т;  $X_8$  – удельный расход ТЭР на производство одной тонны вареных колбасных изделий, кВт·ч/т;  $X_9$  – удельный расход ТЭР на производство одной тонны копченостей, кВт·ч/т;

Интегрированный энерготехнологический комплекс в составе предприятия мясоперерабатывающей отрасли и компрессорной станции магистрального газопровода позволяет обеспечить «бесплодное» энергоснабжение сопряженного промышленного узла в виде мясоперерабатывающего предприятия с утилизацией энергетических отходов компрессорной станции.

$X_{10}$  – удельный расход ТЭР на производство одной тонны субпродуктов, кВт·ч/т;  $X_{11}$  – электропотребление компрессорного цеха за отчетный месяц, тыс. кВт·ч/мес. В качестве выходного параметра (Y) определено электропотребление предприятия за месяц, МВт·ч/мес.

С целью повышения достоверности полученных результатов для обработки исходных данных использованы два альтернативных программных продукта: Deductor Studio Academic 5.3 и NeuroXL Predictor – являющийся надстройкой для MS Excel [17]. Значения входных и выходных параметров за 15 отчетных месяцев, полученные при энергетическом обследовании типового МПП, а также результат расчета в Deductor (Y') и NeuroXL (Y'') для стартового массива информации сведены в таблице. Средняя относительная погрешность спрогнозированных выходных параметров для Deductor Studio Academic и NeuroXL Predictor составила соответственно 4,8%, и 1,1%, что демонстрирует адекватность обеих нейросетевых моделей и их способность с достаточной точностью прогнозировать величину энергопотребления исследуемого объекта при множественных вариациях входных параметров.

Таким образом, методика, основанная на применении нейросетевой технологии с созданием НС-модели энергопотребления предприятия, позволяет определять объемы потребления энергоресурсов (в данном случае электроэнергии) при заданных или варьируемых при необходимости факторах. При применении «обратного» итерационного алгоритма возможно определение планируемой производительности предприятия по основным видам продукции на основании располагаемого объема энергоресурсов или удельных норм расхода энергоресурсов на основе потребляемых их объемов при переработке заданных видов сырья и выпуске заданных видов продукции.

**Таблица 1.** Значения предикторов и выходных параметров разработанных нейроосей

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	Y	Y'	Y''
420	450	305	177	93	41	41	154	216	220	870	1290	1187	1294
490	491	354	172	116	41	41	154	210	220	885	1322	1190	1314
448	616	346	163	120	40	40	154	210	220	893	1276	1184	1275
396	478	288	191	118	40	40	154	216	220	640	976	1051	975
376	482	259	151	101	40	40	154	216	220	584	903	936	926
433	468	257	205	100	40	40	154	221	220	619	990	969	984
298	528	214	137	93	40	40	154	221	221	588	931	914	928
418	437	240	132	100	40	40	151	216	216	233	515	521	511
617	571	302	168	102	40	40	150	216	196	194	515	520	479
692	511	318	206	100	40	40	145	210	187	211	516	528	510
551	541	408	207	97	40	40	145	210	186	726	1060	1162	1075
555	554	401	194	98	40	40	145	210	186	882	1287	1280	1282
419	448	347	177	93	40	40	145	210	186	861	1315	1252	1305
586	491	377	172	116	40	40	145	210	186	885	1318	1246	1325
549	616	411	163	120	39	39	145	210	190	863	1266	1181	1264

**Выводы**

1. Для достижения максимального энергосберегающего потенциала следует расширять границы систем, вовлекаемых в процесс рационализации энергоиспользования. Принципы концепции интенсивного энергосбережения могут быть реализованы путем создания интеграционных энерготехнологических комплексов на базе организаций различного профиля деятельности.

2. Интегрированный энерготехнологический комплекс в составе предприятия мясоперерабатывающей отрасли и компрессорной станции магистрального газопровода позволяет обеспечить «бестопливное» энергоснабжение сопряженного промышленного узла в виде мясоперерабатывающего предприятия с утилизацией энергетических отходов компрессорной станции.

3. Разработанные технические решения и научно обоснованные методические положения позволяют по известным эксплуатационным характеристикам компрессорных станций магистрального газопровода определять рациональный потенциал энергосбережения и синтезировать оптимальные структуры интегрированных энерготехнологических комплексов с производительностью мясоперерабатывающего предприятия, обеспечиваемой этим потенциалом.

4. Разработана и апробирована методика имитационного моделирования на основе нейросетевых моделей для определения и прогнозирования объемов энергопотребления, удельных норм энергоресурсов и производительности предприятия по статистическим данным, отражающим взаимосвязи между видами и объемами сырья и продукции, количеством потребляемых энергоресурсов для различных промышленных энерготехнологий переработки мясных продуктов с приемлемой для практического применения точностью и достоверностью.

**Литература**

1. Ключников, А.Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, научно-методическое и кадровое обеспечение / А.Д. Ключников, С.В. Картавцев // Промышленная энергетика. – 1996. – №8. – С. 2.

2. Ключников, А.Д. Основные направления реализации предельного энергосбережения в теплотехнологии / А.Д. Ключников // Промышленная энергетика. – 1986. – №10. – С. 3–5.

3. Романюк, В.Н. Возможности качественного расширения теплофикации на базе теплотехнологических систем преобразования вещества / В.Н. Романюк, В.К. Судилковский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2005. – №6. – С. 48–54.

4. К вопросу обеспечения графиков электрической нагрузки энергосистемы с привлечением потенциала энерготехнологических источников промышленных предприятий / Б.М. Хрусталев [и др.] // Энергетика и Менеджмент. – 2010. – №1. – С. 4–11.

5. К вопросу использования побочных низкотемпературных тепловых энергоресурсов в системах теплоснабжения предприятий и промышленных узлов / В.Н. Романюк [и др.] // Энергетика и Менеджмент. – 2017. – №5. – С. 4–11.

6. Седнин, В.А. Повышение эффективности газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 6. – С. 14–16.

7. Седнин, В.А. Применение паросиловой установки для повышения энергоэффективности работы газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и Менеджмент. – 2016. – №2. – С. 16–19.

8. Седнин, В.А. Анализ эффективности энерготехнологических установок на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и Менеджмент. – 2016. – №5. – С. 12–17.

9. Седнин, В.А. Технико-экономическое сопоставление технических решений для энергоцентров на базе компрессорных станций магистральных газопроводов / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и Менеджмент. – 2017. – №4. – С. 2–7.

10. Несенчук, А.П. Энергоснабжение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счет утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А.П. Несенчук, А.А. Абрамовский, Т.В. Рыжова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – №6. – С. 32–36.

11. Абрамовский, А.А. Энергосбережение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счет утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А.А. Абрамовский // Инновации, энергоэффективность, образование – залог бережливости: материалы VII науч.-практ. конф., Гродно, 17–19 окт. 2013 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ; редкол.: А.А. Лапко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 17–19.

12. Гусаков, В.Г. Перспективы развития кооперативно-интеграционных процессов в АПК Республики Беларусь / В.Г. Гусаков, А.П. Шпак // Белорусское сельское хозяйство. – 2009. – №7. – С. 11–15.

13. Седнин, В.А. Прогнозирование объемов энергопотребления предприятия агропромышленного комплекса / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергия и Менеджмент. – 2017. – №2. – С. 12–18.

14. Седнин, В.А. Структурная оптимизация энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли / В.А. Седнин, А.А. Абрамовский // Энергоэффективность. – 2019. – №7. – С. 28–31.

15. Боровиков, В.П. Прогнозирование в системе Stastica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере / В.П. Боровиков, Г.И. Ивченко. – М.: Финансы и статистика, 1999. – 384 с.

16. Большов, Л.А. Прогнозирование энергопотребления: современные подходы и пример исследования / Л.А. Большов, М.Ф. Каневский, Е.А. Савельева и др. // Известия РАН: энергетика. – №6. – 2004. – С. 74–92.

17. Осипов Г.С. Основы прогнозирования финансовых временных рядов на базе NeuroXL Predictor // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2017. – №4. – С. 46–52. ■

Статья поступила в редакцию 7.08.2019.