

УДК 621.313.322.

В.В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук; проф. УИПА, г. Харьков
В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук; доц. УИПА, г. Харьков
А.Н. МИНКО, инженер ГП «Электротяжмаш», г. Харьков

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И СНИЖЕНИИ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОРЦЕВОЙ ЗОНЫ НЕАКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Проведен анализ конструкции торцевой зоны неактивной части турбогенератора, сформулированы зависимости массогабаритных параметров торцевой зоны от конструктивных показателей теплообменников и вентилятора. Приведены результаты разработанной программы, направленной на повышение эффективности расчета термодинамических показателей газоохладителей и центробежного вентилятора. Обоснована зависимость материалоемкости конструкции неактивной части турбогенератора от эффективности расчета теплового состояния турбоагрегата.

The Organized analysis to designs butt end zones of the inactive part of turbo-alternator, is worded idea to dependencies mass-gabarit parameter butt end zones from constitution factors gas-chiller and ventilator. The Broughted results of the designed program, directed on increasing of efficiency of the calculation of the thermodynamic factors gas-chiller and centrifugal ventilator. The Motivated dependency to specific consumptions of materials to designs of the inactive part of turbo-alternator from efficiency of the calculation of the heat condition turbo-alternator.

Постановка задачи и анализ литературы.

В процессе решения вопроса снижения массогабаритных показателей и повышения эффективности использования материалов неактивных конструкций [1] турбогенераторов (ТГ) важную роль определяет способ теплоотвода. Главными элементами системы охлаждения являются осевой вентилятор (компрессор) и теплообменники (газоохладители, воздухоохладители). Кроме того, габаритные параметры охладителя (а, следовательно, масса и степень использования конструктивных материалов), определяют массогабаритные показатели коробов, наружных щитов, варианты компоновки торцевой зоны ТГ. В целом масса этих элементов составляет 22–24 % от общей массы установки, [2]. Исходя из вышеизложенного, следует сказать, что расчет эксплуатационных параметров (в том числе и степени эффективности использования материалов) должен вестись с высокой точностью, иметь низкий уровень трудоемкости и не должен требовать высокой квалификации инженера-проектировщика. На ГП «Электротяжмаш» для тепловых расчетов вышеупомянутых элементов используются методики 60^{-ых} годов, с некоторыми изменениями в процессе «пилотного» проектирования. В большинстве случаев выполняется «в ручную», иногда с привлечением самой простой вычислительной техники, т.е. фактически просто автоматизируя процесс выполнения расчетов. С учетом развития современной электронно-вычислительной техники это недопустимо, [3].

Нашей задачей является поиск путей совершенствования выполнения проектных, расчетных работ указанных выше элементов. В частности, попытаться найти пути эффективного, автоматизированного процесса проектирования некоторых элементов ТГ установки: газоохладителя и центробежного вентилятора. Процесс должен обладать минимальным объемом затраченного времени и высокой точностью получаемых результатов. Кроме того, условия осуществления эффективного способа

расчета не должны требовать значительных финансовых затрат и специфических, труднодоступных методик расчета. Таким образом, задачей нашего исследования является повышение качества, удобства и технологической доступности аналитического проектирования охладителей и центробежных вентиляторов современных ТГ, путем оптимизации и автоматизации существующей методики расчета с целью повышения эффективности использования материалов и оптимизации массогабаритных показателей ТГ.

Основной материал.

Анализ опыта иностранных организаций в области турбогенераторостроения, [3], позволяет выделить современные требования к эффективному процессу проектирования и выполнения расчетов, определение методов достижения этих требований. С целью достижения баланса затраченного времени и объемов работ целесообразно использовать прикладные программы для рассматриваемых объектов проектирования.

В настоящее время существует огромный ряд расчетно-конструкторских программ семейства CAD, которые эффективно балансируют эти параметры: время и объем, – при создании инженерных конструкций, моделировании механических и электромагнитных процессов, проработке технологических операций проектируемой конструкции. Однако общепринятая совокупность программ пакета САПР не может учитывать специфику каждой инженерно-конструкторской среды производства, в связи с этим появляется потребность создания расчетно-конструкторских программ для каждого предприятия с учетом особенностей производства (материально-технической базы) и специфики подходов проектирования. Для этого нами была разработана и протестирована программа расчета эксплуатационных показателей газоохладителей и центробежных вентиляторов с водородной и воздушной системами охлаждения ТГ. Программа Fahrenheit v.1.0. (рис. 1) является полноценным и самостоятельным расчетно-конструкторским приложением ОС Windows.

Отличительной способностью программы является принятие решения без участия проектировщика с последующим расчетом заданных характеристик. При этом разработчик задает желаемые исходные данные и в результате получает параметры будущей конструкции проектируемого узла. Мы предлагаем достичь повышения точности расчета за счет исключения ряда допущений, которые использовались ранее на ГП «Электротяжмаш», при проведении подобных расчетов. Например, использование условного значения диаметра молекулы охлаждаемого газа, использование приближенных данных о содержании примесей в воздухе, усреднение показателей химического состава охлаждающей воды и др. Сократить число допусков при расчетах нам позволил отказ от введения данных, полученных по графикам, которые, в свою очередь, были получены в основном экспериментально, т.е. уже имели определенную степень неточности, что усугублялось дальнейшей аппроксимацией в кривую n -го порядка. Примеры таких характеристик показаны на рис. 2 и рис. 3.

Более глубокий анализ расчета [4–5] и проработка современных расчетно-конструкторских рационализаторских предложений обосновал вероятность и эффективность использования только части выше упомянутых характеристик, которые можно описать аналитически. Однако, надо согласиться, что использование таких аналитических данных с предлагаемой затем математической обработкой является трудоемкой для «ручного» расчета, но обладает намного большей точностью, чем прежний «наглядно-интуитивный» способ получения данных. Кроме того, если говорить о проектировании охладителей, следует помнить, что термодинамические

показатели, необходимые для расчета, зависят от конструкций трубок охлаждения, их материала, конструкции и способа оребрения и т.д., т.е. от очень большого числа параметров. (На рис. 4 представлены некоторые конструкции трубок охлаждения).

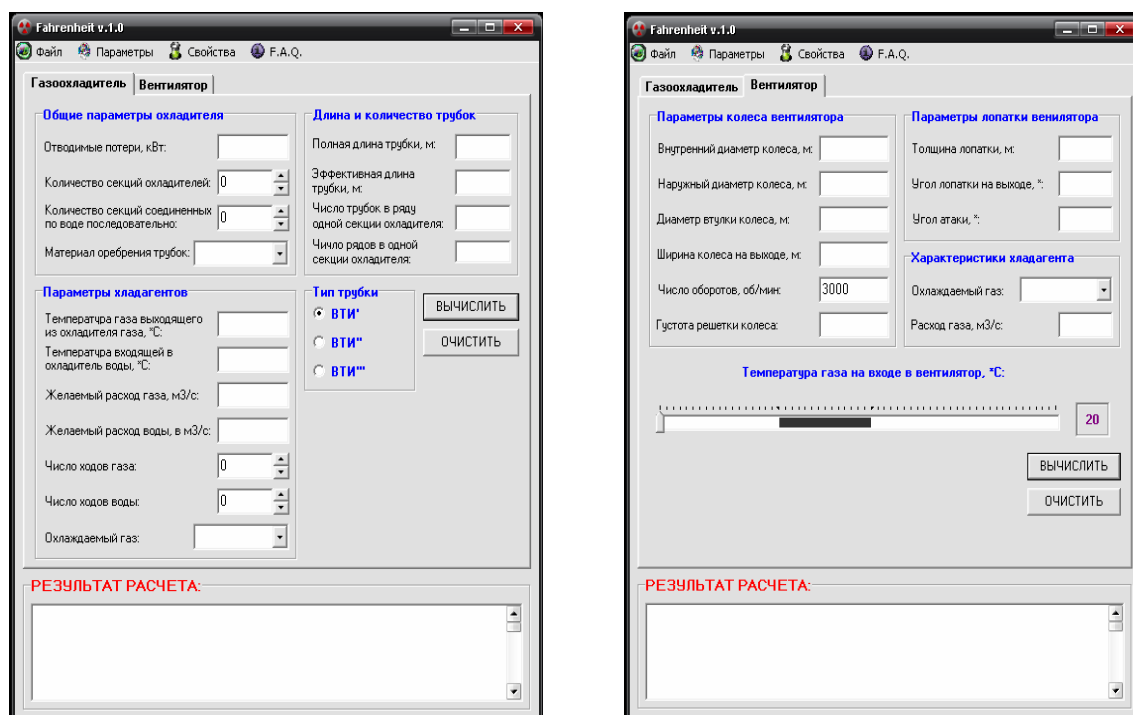


Рис. 1. Интерфейс программы Fahrenheit v.1.0.

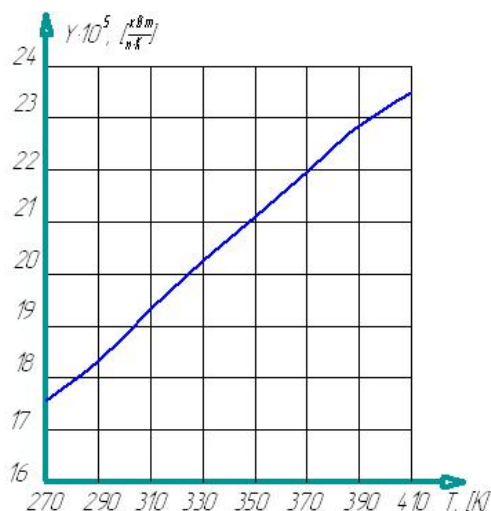


Рис. 2. Коэффициент теплопроводности водорода при давлении 0,1 МПа

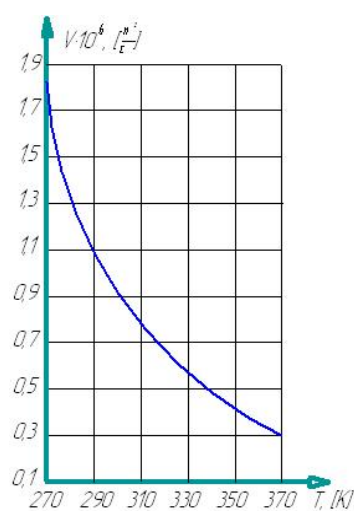


Рис. 3. Коэффициент кинематической вязкости воды при давлении 0,1 МПа

В настоящее время эффективно зарекомендовали себя алюминиевые (мельхиоровые) трубки с проволочным оребрением из меди. На ГП «Электротяжмаш» существует ряд конструкций такого вида трубок, программа Fahrenheit v.1.0. учитывает особенности конструкции этих трубок.

Параметры трубок представлены в таблице 1.

Результаты расчетов по программе Fahrenheit v.1.0. представим для расчета воздухоохладителя для ТГ серии ТА и ТЗФ, среднего класса мощности (150–350 МВт).

Программа ориентирована на расчет скорости охлаждаемого газа в узком сечении охладителя, скорости воды в трубках, падения напора потока газа и потока воды, величины коэффициента запаса теплоотдачи.

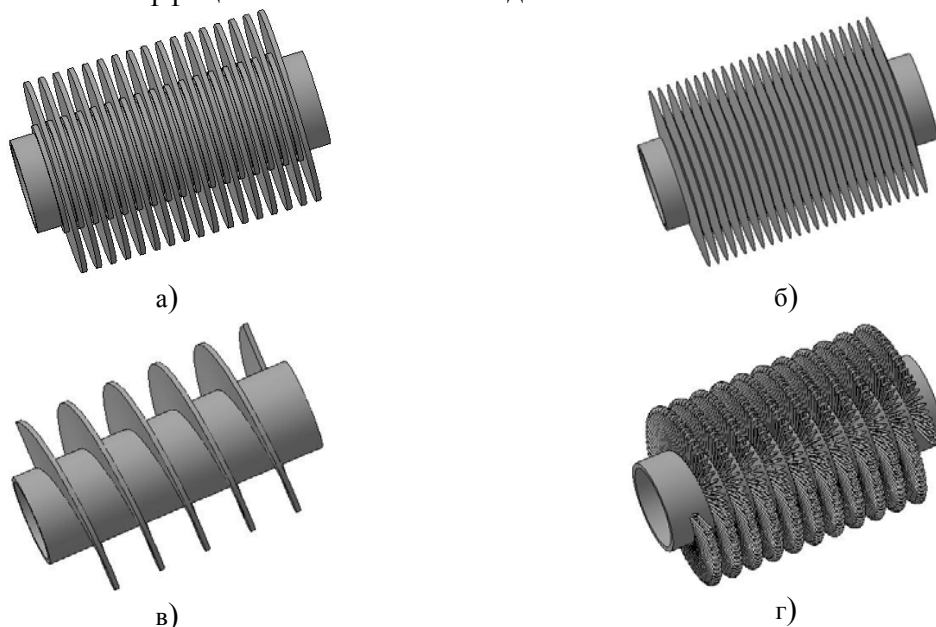


Рис. 4. Некоторые конструкции трубок охлаждения

Таблица 1

Конструкционные параметры трубок ВТИ

Тип трубки	Наружный диаметр трубки, м	Внутренний диаметр трубки, м	Высота оребрения, м	Расстояние между трубками в ряду, м	Расстояние между рядами трубок, м
ВТИ'	0,019	0,017	0,010	0,046	0,032
ВТИ''	0,015	0,013	0,008	0,036	0,027
ВТИ'''	0,012	0,010	0,007	0,032	0,022

Среди вспомогательных свойств имеется функция «Подробный отчет», которая выводит в протокол отчета все просчитанные величины по охладителю (рис. 5 и рис. 6), и функция «В текстовый файл», которая создает на рабочем столе ПК, текстовый файл (otchet.doc) с протоколом отчета рассчитанных величин (протокол готов к выводу на печать).

Для отображения методики расчета выделим исходные данные и сформулируем алгоритм осуществления автоматического многокритериального расчета. Исходные данные, [6], для расчета охладителя:

1 Общие параметры охладителя

1.1 Величина отводимых потерь, кВт

$$P = (P_s \cdot \eta) - Q_R,$$

где P_s – полная мощность ТГ, кВт; η – коэффициент полезного действия ТГ, о.е.; Q_R – механические потери в подшипнике, кВт.

1.2 Количество секций охладителей – n . Для ТГ с воздушной системой охлаждения обычно применяют 4-секционные воздухоохладители (т.е. $n = 4$), для ТГ с водородной системой – 2-секционные газоохладители ($n = 2$). Для осуществления

симметричной системы охлаждения конструктивно предусматриваются 4 охладителя (т.е. $m = 4$), несимметричная система охлаждения, обычно, имеет 2–3 охладителя. Тогда общее количество секций (N) по ТГ составляет: $N = n \cdot m$.

1.3 Количество секций последовательно соединенных по воде – n_w . Ряд конструкций теплообменников рассчитан для использования последовательного соединения секций по ходу воды, с целью уменьшения количества водоснабжающих трубопроводов. Если в одном охладителе 4 секции ($n = 4$), то n_w не может быть больше четырех, если каждая секция имеет индивидуальный подвод воды, то в таком случае $n_w = 1$.

Рис. 5. Заполненный интерфейс программы

Параметры охладителя
 Теплоотдающая поверхность охладителя = 1289,91744
 Узкое сечение охладителя = 4,15547808
 Перегрев газа в генераторе = 28,7450193142498
 Средняя температура газа = 59,3725096571249
 Коэф. кинематической вязкости газа = 1,89123385411116E-5
 Коэф. теплопроводности газа = 2,92602852436299E-5
 Плотность газа = 1,04633733669819
 Скорость газа в узком сечении = 13,8337419454479
 Число Рейнольдса для потока газа = 3657,33246456436
 Число Эйлера для потока газа = 6,68000718858959
 Падение напора газа в охладителе = 1337,60533615499
 Число Нуссельта = 21,9090541087563
 Конвективный коэф. теплоотдачи = 0,128213034528066
 Коэф. теплового сопротив. оребрения = 0,920712825244147
 Приведенный коэф. теплоотдачи = 0,10067065218967
 Проходная площадь труб = 0,261504
 Скорость воды в трубках = 1,78454886604666
 Падение напора воды в охладителе = 43441,9351071325
 Перегрев воды в охладителе = 3,91458074916948
 Средняя температура воды = 35,9572903745847
 Плотность воды = 995,279991843442
 Коэф. кинематической вязкости воды = 7,1271342808218E-7
 Число Прандтля = 4,87361787303163
 Коэф. теплопроводности воды = 0,000618192504087055
 Число Рейнольдса для воды = 42565,9592305243
 Внутренний коэф. теплоотдачи = 7,95780291092865
 Располаг. коэф. теплоотдачи = 0,0881260544650255
 Разность температур при противотоке = 21,0502957290008
 Тепловая нагрузка охладителя = 0,0699734818748472
 Запас теплоотдачи = 20,5984174605054

Рис. 6. Протокол отчета программы

1.4 Материал оребрения трубок. Из предложенного перечня материалов, выбранных для оребрения, предложены: алюминий, медь и серебро. От выбранного материала зависит коэффициент теплопроводности погонного метра оребренной трубки. В дальнейшем планируется расширение перечня материалов.

2 Параметры используемых хладагентов

2.1 Поскольку вода является неизменным хладагентом, то остается выбрать газовую среду охлаждения: воздух, водород. Этот выбор зависит от типа ТГ и его системы охлаждения.

2.2 Температура выходящего газа из охладителя (в °C), устанавливается в зависимости от: типа изоляции (класс нагревостойкости), особенностей конструкции системы охлаждения и климатических условий окружающей среды. Обычно этот параметр находится в диапазоне 35–50 °C.

2.3 Температура входящей воды в охладитель, (в °C). Довольно часто технологический процесс блока электростанции определяет температуру входящей воды, которая, как правило, поступает из конденсатора турбины; либо заказчик включает дополнительные требования относительно этой температуры. Согласно требованиям термодинамики, значения температуры входящей воды необходимо устанавливать так, чтобы её разность с температурой охлаждаемого газа не совпадала с «точкой росы».

2.4 Желаемый расход газа, в м³/с, зависит от количества тепла, которое необходимо отвести и от теплоемкости хладагента, определяется следующим образом

$$Q_A = P / (1,1 \cdot j_A),$$

где P – величина отводимого тепла, в кВт; 1,1 – тепловой эквивалент газа; j_A – разность температур охлаждаемых сред, °С.

2.5 Желаемый расход воды, в м³/с. Аналогично расходу газа, расход воды зависит от собственной теплоемкости, и от количества тепла, которое необходимо отвести, и определяется как

$$Q_W = P / (4,18 \cdot j_W),$$

где j_W – разность температуры воды и газа; 4,18 – тепловой эквивалент воды.

2.6 Количество ходов газа, зависит от конструкции системы охлаждения и обычно составляет 1–2 хода.

2.7 Количество ходов воды определяется конструктивно по результатам общего теплового расчета по генератору и конструктивными особенностями подвода воды к охладителю. Количество ходов воды не может быть больше чем количество секций охладителя.

3 Длина и количество трубок

3.1 Полная длина трубки, в м.

3.2 Эффективная длина трубки, в м. Длина трубки с оребрением составляет примерно 5–10 % от полной длины трубки, в зависимости от способа и мест крепления распорок охладителя.

3.3 Количество трубок в ряду одной секции. В связи с тем, что трубки в охладителе располагаются в шахматном порядке, алгебраическое число трубок может быть дробным, и определяется как среднеарифметическое из числа двух рядов трубок (малого и большого).

3.4 Количество рядов трубок в одной секции охладителя.

4 Тип трубки. Как отмечалось выше – расчет осуществляется для трех типов трубок: ВТИ', ВТИ'', ВТИ'''.

На рис. 7 приведен алгоритм расчета по программе Fahrenheit.

Краткое руководство по использованию программы Fahrenheit v.1.0. можно получить, воспользовавшись пунктом меню «Справка». В результате тестирования и эксплуатации было выявлено ряд положительных моментов используемой программы и ряд недостатков.

К достоинствам программы Fahrenheit v.1.0. следует отнести:

- автоматизация расчетов и высокая точность получаемых результатов;
- удобный и интуитивно понятный интерфейс управления;
- перекодировка протокола расчета в текстовый файл;
- расчет производится на самые распространенные среды охлаждения и наиболее применяемые конструкции лопаток вентилятора и трубок охлаждения;
- нет необходимости в использовании дополнительных справочных данных и сторонних приложений;
- создание программы потребовало минимальных финансовых затрат.

Недостатки программы Fahrenheit v.1.0.:

- узкая спецификация, ориентированная на проектировку конкретного узла, с учетом особенностей отдельно взятого предприятия;
- отсутствие возможности совместной работы с другими программами семейства САПР;

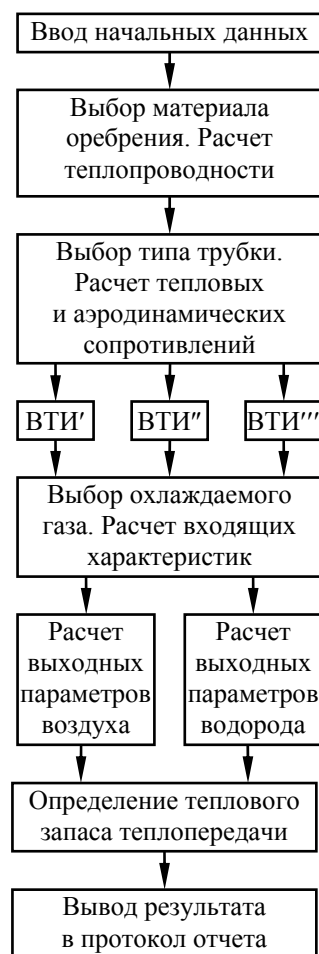


Рис. 7. Алгоритм расчета

– недостаточно высокий уровень функциональности (т.е. не строит графики, диаграммы, 3D-модели и д.р.).

В дальнейшем наши действия будут направлены на устранение вышеизложенных недостатков, с целью развития и повышения функциональности программы Fahrenheit v.1.0.

В заключении необходимо отметить, что эффективный расчет вышеупомянутых элементов системы охлаждения приведет к оптимизации массогабаритных параметров и целесообразному снижению материалоемкости конструкции неактивной части турбогенератора, что, собственно, и повысит его конкурентоспособность на рынке турбогенераторостроения.

Выводы:

1) Представлен краткий анализ конструкции торцевой зоны неактивной части турбогенератора, обоснован подход к оптимизации массогабаритных параметров, снижению материалоемкости конструкции путем повышения эффективности расчета элементов системы охлаждения генератора.

2) Создана программа Fahrenheit v.1.0. для осуществления эффективного расчета центробежного вентилятора и газоохладителей турбогенераторов ГП «Электротяжмаш». Сформулированы необходимые исходные данные для осуществления расчета (на примере воздухоохладителя), приведен алгоритм работы программы.

3) Перечислены достоинства и недостатки программы после ей тестирования, намечены пути для дальнейшего совершенствования программы для решения конкретных задач

реального производства.

4) Установлено, что семейство программ СПАР не всегда может удовлетворять всем требованиям отдельно взятой структурной единицы производства, и неизбежно возникает необходимость разработки расчетно-конструкторских программ, направленных на специфическую проектировку отдельно взятых конструктивных элементов ТГ с учетом особенностей их производства на предприятии. Такие приложения в будущем смогут дать высокий технико-экономический эффект для данного предприятия.

Список литературы: 1. Шевченко В.В. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения / В.В. Шевченко, А.Н. Минко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 3. – С. 108-112. 2. Кузьмин В.В. Новое поколение турбогенераторов с полным воздушным охлаждением / В.В. Кузьмин и др. // Новини енергетики. – 2001. – № 9. – С. 74-76. 3. Аврух В.Ю. Теплогидравлические процессы в турбо и гидрогенераторах / В.Ю. Аврух, Л.А. Дугинов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с. 4. Муценек К.Я. Пути снижения веса электрических машин и экономия металла. – Рига: Академия наук Латвийской ССР, 1961. – 113 с. 5. Журавлев В.Н. Снижение веса машиностроительных конструкций. – Свердловск, 1961. – 240 с. 6. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – Киев: Машиностроение, 1968. – 428 с.

© Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н., 2011
Поступила в редколлегию 21.01.11