

НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ ОНИЛ ОВВБ ТЭС И АЭС ИГЭУ ПО ГАЗООТВОДЯЩИМ ТРАКТАМ ТЭС

САЛОВ Ю.В., акад. АПЭ, СЕМАШКО В.А., ШЕЛЫГИН Б.Л., ВАРНАШОВ В.В., кандидаты техн. наук

Рассматриваются методы и способы повышения надежности, экономичности и безопасности работы внешних газоходов и дымовых труб ТЭС, используемые в отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОВВБ ТЭС и АЭС, приведены результаты практического использования разработок.

Отраслевая научно-исследовательская лаборатория охраны воздушного и водного бассейнов от вредных выбросов тепловых и атомных электрических станций (ОНИЛ ОВВБ ТЭС и АЭС) была организована на базе Ивановского государственного энергетического института в 1981 г. Основными научными направлениями ОНИЛ ОВВБ ТЭС и АЭС следует считать:

- повышение надежности и долговечности работы дымовых труб и примыкающих к ним внешних газоходов;

- сокращение энергозатрат на привод тягодутьевых машин;
- сокращение вредных выбросов в атмосферу от тепловых и атомных электрических станций.

В качестве инструментов научно-исследовательских работ в ОНИЛ используются такие методы, как:

- экспериментальные натурные исследования на реальных объектах;
- экспериментальные исследования на моделях;
- теоретические изыскания с привлечением аппарата математической физики;
- математическое моделирование исследуемых процессов;
- разработка алгоритмов и программ численного моделирования на ЭВМ.

Приоритетными задачами ОНИЛ считаются работы, связанные с трактом уходящих газов, расположенным за пределами здания основного технологического оборудования и непосредственно влияющим на экологическое состояние окружающего пространства. К таким работам относятся:

- разработка аэродинамических схем и отдельных элементов тракта внешних газоходов от диффузор-поворота после дымососа до входа в трубу с учетом аэродинамических и тепловлажностных показателей;

- организация сопряжения газоходов с дымовыми трубами и выполнение цокольной части дымовых труб с минимальными гидравлическими потерями;

- конструктивное выполнение стволов дымовых труб с учетом аэродинамических и тепловлажностных показателей;

- разработка оголовков дымовых труб с учетом аэродинамических факторов работы ствола, наилучшего рассеивания вредных выбросов и защиты от самоокутывания;

- разработка способов защиты ограждающих конструкций газового тракта от высокотемпературного воздействия уходящих газов и низкотемпературной коррозии;

- исследование влияния переменных режимов работы котельных установок на работу трактов уходящих газов.

Многолетние исследования показали, что основными факторами, определяющими надежную и экономичную работу тракта уходящих газов, являются:

1. Аэродинамическое выполнение тракта. Правильно спроектированная аэродинамическая схема позволяет снизить гидравлические сопротивления, исключить пульсации потоков, вызывающие разрушающие вибрации, и предотвратить выпадение золовых отложений, приводящих к увеличению гидравлических потерь, а в ряде случаев даже к обрушению перекрытий под тяжестью отложений. Снижение гидравлических сопротивлений обеспечивает снижение затрат энергии на тягодутьевые установки, а также позволяет устранять возникновение избыточных давлений, приводящих к выбиванию газов из газоходов в окружающее пространство и его загрязнению.

2. Температурный режим строительных конструкций. Этот фактор играет огромную роль как с точки зрения возникновения температурных напряжений, приводящих к разрушению строительных конструкций, так и с точки зрения влияния их на влажностный режим и скорость коррозии. Одной из наиболее распространенных причин разрушения строительных конструкций газового тракта ТЭС являются коррозионные процессы, возникающие в результате конденсации паров воды и серной кислоты на внутренних поверхностях внешних газоходов и дымовых труб при снижении температуры контактирующих поверхностей ниже температуры точки росы.

3. Влажностный режим ограждающих конструкций. Даже полное исключение возможности образования конденсата на внутренних поверхностях еще не гарантирует ограждение от увлажнения, происходящего в результате сорбции и конденсации паров в толще самих ограждений. В результате

коррозионные процессы при полном внешнем благополучии «невидимо» идут внутри конструкций. Ситуация еще более осложняется в зимних условиях эксплуатации, когда при остановках котлов скопившаяся в толще ограждения влага замерзает и, расширяясь, приводит к дополнительным разрушениям.

Исследованию этих факторов и учету их при разработке новых и реконструкции существующих трактов уделяется особое внимание.

В ОНИЛ ОБВБ ТЭС и АЭС выполнен большой комплекс работ по изысканию рациональных форм аэродинамических элементов тракта уходящих газов. Основное внимание было уделено разработке наиболее часто используемых элементов – поворотов. При современных тенденциях индивидуального выполнения тракта «дымосос – газоход – дымовая труба» повороты являются практически единственными источниками местных гидравлических сопротивлений.

В основу изысканий было положено математическое моделирование течений плоскопараллельных потоков, опирающееся на математический аппарат теории функции комплексного переменного. Рассматриваемые области течения с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца отображались на простейшую полосу, находились формулы для построения линий тока и на их основе, используя принцип «затвердевания» линий тока, анализировались возможные контуры течения исследуемых каналов. Далее полученные предварительные теоретические решения анализировались путем их продувки на экспериментальных моделях и находились формы каналов, соответствующие минимальным гидравлическим сопротивлениям. Результаты исследований были обобщены в виде аппроксимирующих математических формул, пригодных для повседневного практического использования, и номограмм. Решения были получены для поворотов на различные углы без изменения сечения, поворотов с сужениями сечения на выходе и для диффузор-поворота после дымососа [1]. Кроме того, были получены решения для различных видов поворотов в условиях стесненной компоновки, когда поворот с минимальными потерями «вписывается» внутрь ограничивающих его прямолинейных стенок, например, в газоход из панелей сборного железобетона.

Одним из наиболее сложных аэродинамических элементов в схеме газоотводящего тракта является сопряжение внешних газоходов с дымовой трубой. Подключение в большинстве случаев осуществляется с двух сторон дымовой трубы, при этом нерациональное выполнение цокольной части приводит к соударению встречных потоков, возникновению пульсаций и значительным гидравлическим потерям. Изыскание рациональных форм для этого элемента газоотводящего тракта возможно только путем многократного аэродинамического эксперимента на моделях, позволяющего определить коэффициент местного сопротивления той или иной конструкции. Такие исследования неоднократно проводились для различных дымовых труб с разным количеством подключаемых внешних газоходов. В качестве примера можно привести разработку схем цокольной части дымовых труб № 1 и 3 Костромской ГРЭС [2, 3], которые внедрены в 2002-2003 гг. при реконструкции газоотводящего тракта энергоблоков 300 МВт и капитальном ремонте энергоблока 1200 МВт.

Большое внимание уделяется разработке такого важного элемента дымовой трубы, как ее оголовок. Его назначение заключается в следующем:

- снижении статических давлений в газовом тракте;
- повышении дальности выходной струи и улучшении рассеивания вредных выбросов;
- снижении самоокутывания верхней части несущего ствола и его разрушению.

Решение каждого из этих вопросов требует индивидуального подхода и совершенно разных конструктивных решений. Многие из этих решений подтверждены свидетельствами и патентами на изобретения и полезные модели [4–7], часть из которых внедрены на ряде ТЭС.

Примером выполнения оголовка, предназначенного для улучшения всех перечисленных выше показателей, является оголовок дымовой трубы Н=120 м для блока Т-250-300 ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго», который внедрен в 2004 г.

Для всестороннего анализа процессов, происходящих в газоотводящем тракте ТЭС, и выработки правильных технических решений необходимо применение математического моделирования работы всех элементов этого тракта. Силами ОНИЛ ОБВБ ТЭС и АЭС разработан комплекс программ, позволяющий производить всестороннюю оценку работы всех элементов газоотводящего тракта на основе теплотехнических, аэродинамических и влажностных расчетов, а также расчетов скорости коррозии строительных материалов. Комплекс разрабатывался на основе исследований теоретического, расчетного и экспериментального характера по определению надежности работы внешних газоходов и дымовых труб. Он может быть использован как для проектирования и реконструкции элементов газоотводящего тракта, так и для анализа режимов работы существующих конструкций в процессе эксплуатации.

Программный анализирующий комплекс состоит из четырех основных модулей.

Первый из них – модуль расчета параметров уходящих газов и КПД котлов. Он выполняет следующие расчеты: КПД котлов; объемного расхода уходящих газов в текущих режимах эксплуатации; температуры точки росы уходящих газов по тракту, включая воздухоподогреватели котлов и газоходы после дымососов; парциального давления водяных паров в уходящих газах; минимальной температуры подогрева воздуха перед воздухоподогревателем при условии отсутствия коррозии строительных конструкций

газоотводящего тракта; скорости коррозии металла низкотемпературных элементов воздухоподогревателя и примыкающих газоходов; валовых выбросов вредных веществ от котлов. С использованием этого модуля можно определять наиболее экономичные режимы работы котлов в зависимости от параметров наружного воздуха, нагрузки блоков, вида и состава сжигаемого топлива, температуры воздуха перед воздухоподогревателем с учетом оценки коррозионной надежности низкотемпературных элементов газоотводящего тракта. Результаты расчета параметров уходящих газов после котлов являются исходными данными для модуля расчета внешних газоходов.

Следующие три модуля в рассматриваемом комплексе представляют программы для расчета:

- 1) внешних газоходов;
- 2) дымовых труб;
- 3) рассеивания вредных выбросов.

Программы первых двух модулей позволяют проводить расчеты процессов тепло- и массопереноса, определять температурные поля по сечениям строительных конструкций, оценивать величину конденсации влаги с агрессивными компонентами в толще ограждений, определять гидравлические потери и распределение статических давлений по длине тракта, рассчитывать скорости коррозии с учетом свойств используемых материалов и др. Рассмотрим основные особенности функционирования этих программ.

Алгоритм построения температурных полей по длине газового тракта от дымососа до выхода из трубы основывается на интервально-итерационном методе, при котором расчет производится последовательно по участкам, а внутри каждого из них расчет теплопередачи производится методом последовательных приближений на основе решения уравнений теплового баланса и теплопередачи.

Программа *теплотехнического* расчета внешних газоходов [1, 8] позволяет количественно оценить снижение температуры газов по длине газохода, определить изменение температур по сечениям стенок и выявить зоны с наиболее неблагоприятными температурными режимами работы. Исходными данными для расчетов являются измеряемые температуры и расходы уходящих газов на входе в каждый газоход, геометрические и теплофизические параметры ограждающих конструкций и др.

Вычисляемые в конце внешних газоходов значения температур, расходов, парциального давления водяных паров и температуры точки росы уходящих газов служат исходными данными для расчетов дымовой трубы. Если в процессе эксплуатации на ТЭС организуются замеры температур, то появление различий между расчетными и измеряемыми параметрами газов в конце того или иного участка тракта в процессе эксплуатации может свидетельствовать о нарушении плотности ограждающих конструкций, то есть о возникновении разрушений.

Теплотехнический расчет конструкций дымовых труб организуется по аналогичному принципу, однако здесь учитываются дополнительные усложняющие расчет факторы, такие, как тепло- и массообмен газа с параллельными потоками воздуха в вентилируемых воздушных зазорах и каналах. Поэтому для расчетов дымовых труб разработаны программы в соответствии с особенностями их конструкций [1, 9, 10, 11]:

- прижимной кирпичной футеровкой;
- вентилируемым воздушным зазором;
- проходным вентилируемым каналом.

На основании совместного аэродинамического и теплотехнического расчетов далее выполняется расчет *влажностного* режима работы ограждающих конструкций газоходов и дымовых труб. Конденсация влаги на поверхностях возникает при снижении температуры стенок ниже температуры точки росы уходящих газов. Наличие ее прогнозируется по результатам теплотехнического расчета. Особенно опасно наличие конденсации при сжигании высокосернистых топлив, так как она сопровождается образованием агрессивной серной кислоты. Конденсация внутри конструкций возникает при определенных условиях движения паров через стенку вследствие разности их парциальных давлений, зависит от распределения температуры по сечению и является одной из причин разрушения материалов ограждений. Расчеты влажностных режимов паропроницаемых ограждений предусмотрены во всех расчетно-анализирующих программах, а для металлических паронепроницаемых поверхностей производится оценка скорости коррозии.

Последний из перечисленных выше модулей (модуль расчета рассеивания вредных выбросов), определяет концентрацию вредных выбросов в атмосфере при всех возможных режимах эксплуатации станции и предельно допустимые уровни загрязнений в соответствии с существующими нормами.

Таким образом, рассмотренный программный комплекс позволяет всесторонне анализировать работу газоотводящего тракта, прогнозировать состояние всех элементов и принимать соответствующие проектные решения, направленные на повышение надежности их работы. Например, результаты, полученные в процессе моделирования компоновки газоотводящего тракта, положены в основу разработки проекта реконструкции внешних газоходов и дымовой трубы 1-й очереди Костромской ГРЭС, которые внедрены в 2000–2002 гг.

Использование программного комплекса непосредственно в процессе эксплуатации на ТЭС предоставляет возможность персоналу осуществлять такие операции, как:

- определение экономичности работы котлов;

- определение параметров уходящих газов, необходимых для анализа работы внешних газоходов и дымовых труб;
- анализ параметров работы внешних газоходов и дымовых труб в зависимости от режимов работы котлов, вида сжигаемого топлива и климатических условий;
- выявление элементов конструкций внешних газоходов и газоотводящих стволов дымовых труб, подвергающихся наибольшему воздействию агрессивных газов при нарушении температурно-влажностного режима;
- принятие соответствующих решений по изменению режимов эксплуатации конструкций в целях повышения надежности их работы.

Такой оперативный анализ особенно актуален в настоящее время, так как из-за спада промышленного производства ТЭЦ и ГРЭС вынуждены работать большую часть времени с нагрузкой, значительно ниже установленной мощности. В отношении газоотводящего тракта это означает снижение температуры и расходов уходящих газов. Последнее приводит к уменьшению скоростей газов, то есть к ухудшению теплоотдачи и дополнительному снижению температуры стенок газоходов. В результате температура уходящих газов и стенок снижается до температуры точки росы и ниже.

Работа на сернистых топливах приводит к конденсации агрессивных паров серной кислоты на стенках и в толще ограждающих конструкций газоходов и дымовых труб с последующим их разрушением от сернокислотной коррозии. Таким образом, дымовые трубы и внешние газоходы, рассчитанные на работу с номинальной нагрузкой подключенных котлов, подвергаются ускоренному разрушению из-за нерасчетного режима эксплуатации.

На основе анализа неблагоприятных режимов работы возможно создание своеобразных режимных карт, позволяющих персоналу выбирать оптимальный режим работы оборудования. Использование программного комплекса для персонала ТЭС тестировалось и внедрено в ОАО «Костромская ГРЭС».

Особый интерес для проектирующих организаций представляет разработка конструкций дымовых труб с наперед заданными теплоаэродинамическими параметрами. Алгоритмы и программы синтеза новых проектных решений дымовых труб разработаны в ОНИЛ для двух типов конструкций газоотводящих стволов: одноствольных с прижимной футеровкой и с вентилируемым воздушным зазором между несущим и газоотводящим стволами.

При этом во всех случаях принимается, что несущая оболочка трубы уже спроектирована специализированной проектной организацией и представляет заданную неизменяемую конструкцию, а ее наполнение (количество и размеры слоев тепловой изоляции, величина воздушного зазора и др.) рассчитывается с учетом ряда обязательных требований. Например, для труб с вентилируемым воздушным зазором согласно этим требованиям должны обеспечиваться:

- необходимое противодавление в воздушном зазоре по отношению к газовому;
- допустимый перепад температур на футеровке внутреннего ствола, не превышающий максимального значения из условий трещиностойкости;
- допустимая температура внутренней поверхности бетона;
- отсутствие конденсации агрессивных паров на внутренней стенке газоотводящего ствола.

Соблюдение второго и третьего требования в основном реализуется выбором необходимой температуры воздуха на входе в канал и поддержанием ее в нужных пределах по всей высоте воздушного зазора. Это достигается регулированием соотношений тепловых потоков через газоотводящий и несущий стволы дымовой трубы путем взаимозависимого выбора характеристик тепловой изоляции на обоих стволах. Регулирующий, изменяющийся по высоте трубы слой тепловой изоляции можно располагать на одном из стволов (или на внутренней стороне несущего ствола, или на газоотводящем), а на другом стволе оставлять теплоизоляцию постоянной или не устанавливать ее совсем, если это не мешает выполнению указанных выше требований. Разработанная методика расчета позволяет проектировать конструкции труб, обеспечивающих практически любой заданный температурный режим работы воздушного канала при условии создания в нем необходимого противодавления. По данной методике было выполнено несколько проектных расчетов дымовых труб, работоспособность которых при различных режимах работы проверялась с помощью вариантных поверочных расчетов анализирующего программного комплекса.

Все указанные выше программы реализованы на языке Паскаль в среде Delphi для персональных компьютеров.

Для защиты окружающей среды от вредных выбросов ОНИЛ предложен комплексный метод огневого обезвреживания замазученных и соленых стоков ТЭС [12].

В ходе технологического процесса выработки энергии на ТЭС образуются сточные воды, загрязненные нефтепродуктами с мазутного и масляного хозяйств, соленые продувочные воды из расширителей продувки котлов, водоподготовительных установок и др. Большое значение имеет применение наиболее надежных и экономичных методов их обезвреживания. В зависимости от технологических условий, количества и состава отходов применяются различные методы их обработки. Однако применительно к замазученным, замасленным и соленым сточным водам наиболее целесообразно использование огневого метода обезвреживания в топочном объеме котла.

Такой метод не только устраняет накопление отходов на территории предприятия, но и позволяет использовать высокообводненный мазут в качестве вторичных энергоресурсов для выработки электрической и тепловой энергии. Он может быть реализован на ТЭС с барабанными паровыми котлами. Для организации обезвреживания стоков в топке котла целесообразно использование вихревых горелок, имеющих центральный ствол (воздушный канал) для возможного размещения распыливающих устройств (мазутных форсунок). В этом случае нет необходимости в специальных амбразурах в обмуровке котла для установки устройств индивидуальной подачи воздуха. Воздух, необходимый для окисления горючей части стоков, в достаточном количестве может подаваться через имеющиеся воздушные регистры горелки. Кроме того, подача стоков в ядро факела позволяет снизить локальный уровень максимальных температур в топочном объеме и, как следствие, уменьшить скорость образования окислов азота при сжигании энергетического топлива.

В ОНИЛ разработана схема подачи отходов в факел энергетического топлива, которая позволяет надежно использовать ее в зимних условиях эксплуатации. Предложено распыливание стоков осуществлять с помощью специально разработанного распылителя, устанавливаемого в топке по оси горелочного устройства вместо штатных форсунок. Расчетно-аналитическим методом определены условия распыливания двухфазного потока отходов при радиационном их нагреве в распылителе. В ходе промышленных испытаний установлена эффективность и надежность рассматриваемого метода обезвреживания стоков применительно к ТЭЦ с паровыми котлами типа ТП-87, сжигающих Кузнецкий тощий уголь при мокром золоулавливании.

Важным вопросом, решаемым в рамках научного направления ОНИЛ, является разработка способов повышения надежности работы газоотводящих стволов дымовых труб для отвода уходящих газов от газотурбинных установок (ГТУ).

Вопрос маневренности работы газовых турбин ПГУ (как в составе ПГУ, так и в автономном режиме) ставит в жесткие рамки надежность конструкции внешних газоходов и дымовых труб, которые требуют использования теплоустойчивых марок сталей, что в свою очередь увеличивает капитальные затраты на сооружение блоков ПГУ.

В целях повышения надежности работы дымовых труб и газоходов ГТУ при любых режимах эксплуатации в ОНИЛ разработаны способы защиты газоотводящих стволов от высоких температур уходящих от ГТУ газов (до 550°C) при использовании низколегированных и более дешевых марок сталей (например, 09Г2С). Защита осуществляется за счет подачи в область пограничного слоя высокотемпературного потока уходящих газов атмосферного воздуха, который оттесняет высокотемпературные газы от стенки, снижая ее температуру до безопасных значений для используемых марок сталей (до 430–450°C).

Практическая реализация данного способа защиты газоотводящих стволов от высоких температур осуществлена в ОАО «Мосэнерго» филиале ГРЭС № 3 им. Р.Э. Классона на дымовой трубе Н = 150 м, предназначенной для удаления уходящих газов от 2-х газотурбинных установок типа ГТЭ-150 (ОАО ЛМЗ). Дымовая труба состоит из несущей железобетонной оболочки и внутреннего металлического газоотводящего ствола (ВМС) диаметром 10,5 м. Ствол по высоте состоит из четырех участков: три верхних подвешены к железобетонной оболочке, а нижний, самонесущий с шарнирным опиранием, – на фундамент трубы. Участки стволов соединены компенсаторами.

Для охлаждения верхних участков газоотводящего ствола разработаны специальные камеры с соплами и автоматическими клапанами подачи охлаждаемого воздуха [13] в область пограничного слоя уходящих газов, устанавливаемые в местах компенсаторов. Для защиты нижней части газоотводящего ствола разработан новый цоколь ВМС для отвода высокотемпературных (500–530°C) газов от двух ГТЭ-150 [14]. В нижней части цоколя газоотводящего ствола установлены автоматические клапаны подачи воздуха в область между вставкой и газоотводящим стволом. Разработанная цокольная часть позволила отказаться от сооружения второго газоотводящего ствола для паровых котлов и завести их в ствол ГТУ. Разработки способа защиты позволили использовать при сооружении ствола ГТУ сталь марки 09Г2С вместо 12МХ и сократить капитальные затраты.

Список литературы

1. **Повышение** эффективности работы ТЭС: Тр. ИГЭУ. Вып. 3 / Под ред. А.В. Мошкарин. – Иваново, 1999. Разд. «Внешние газоходы и дымовые трубы».
2. **Повышение** эффективности работы газоотводящего тракта энергоблока 1200 МВт ОАО «Костромская ГРЭС» / С.Н. Балдин, Н.Н. Балдин, Ю.В. Салов и др. // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2003. – № 4. – С. 48–50.
3. **Свидетельство** на полезную модель № 3451 / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, О.Е. Таран и др. Бюлл. № 1, 1997.
4. **Свидетельство** на полезную модель «Дымовая труба», № 17800 / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, С.Н. Балдин и др. Бюлл. № 12, 2001.
5. **Свидетельство** на полезную модель «Дымовая труба», № 17801 / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, С.Н. Балдин и др. Бюлл. № 12, 2001.
6. **Свидетельство** на полезную модель «Дымовая труба», № 17802 / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, С.Н. Балдин и др. Бюлл. № 12, 2001.
7. **Свидетельство** на полезную модель «Оголовок дымовой трубы», № 35412 / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, В.М. Порошин. Бюлл. № 1, 2004.

- 8. Программа** для ЭВМ «Теплоаэродинамический расчет внешних газоходов ТЭС» / Ю.В. Салов, В.А. Семашко, В.В. Варнашов и др. // Свидетельство № 2002610803. – М.: Роспатент, 2002.
- 9. Программа** для ЭВМ «Теплоаэродинамический расчет дымовых труб ТЭС с вентилируемым воздушным зазором» / Ю.В. Салов, В.А. Семашко, В.В. Варнашов и др. // Свидетельство № 2002610804. – М.: Роспатент, 2002.
- 10. Программа** для ЭВМ «Теплоаэродинамический расчет дымовых труб ТЭС с проходным вентилируемым каналом» / Ю.В. Салов, В.А. Семашко, В.В. Варнашов и др. // Свидетельство № 2002610805. – М.: Роспатент, 2002.
- 11. Программа** для ЭВМ «Теплоаэродинамический расчет дымовых труб с прижимной футеровкой» / Ю.В. Салов, В.А. Семашко, В.В. Варнашов и др. // Свидетельство № 2004611807. – М.: Роспатент, 2004.
- 12. Комплексный** метод огневого обезвреживания замазученных и солевых стоков ТЭС / Ю.В. Салов, Б.Л. Шелыгин, В.В. Варнашов и др. // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2004. – № 3.
- 13. А. с. 1728453 СССР** «Дымовая труба» / Ю.В. Салов, В.В. Варнашов, А.Е. Осочка и др. Бюлл. № 19, 1992.
- 14. А. с. 1783243 СССР** «Дымовая труба» / Ю.В. Салов, Б.Л. Шелыгин, В.В. Варнашов и др. Бюлл. № 47, 1992.