

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ЗЕРНА В СВЧ-ПОЛЕ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ПОМОЛУ

АНИСИМОВ Александр Владимирович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

Создана экспериментальная установка для проведения исследований по СВЧ-сушке с многофункциональной системой управления технологическим процессом и сохранением информации с использованием приборов фирмы ОВЕН: измерителя-регулятора МПР-51-Щ4 и адаптера интерфейса АС4. Приведена структурная схема усовершенствованной системы управления сушкой зерна. Описаны ее возможности, принцип работы и методика проведения экспериментальных исследований. Проведены экспериментальные исследования на шелушильно-сушильной установке; представлены их результаты.

В настоящее время мировая наука и практика пришла к выводу, что одним из наиболее перспективных путей дальнейшего повышения эффективности переработки зерна является совершенствование подготовки его к помолу. В частности, это внедрение автоматизированных комплексов, позволяющих точно управлять режимами увлажнения, гидротермической обработки (ГТО) и подогрева зерна. Данные системы позволяют в автоматическом режиме рассчитывать соотношение воды и зерна в зависимости от его текущей влажности, подогревать его при необходимости. Все это позволяет не только экономить энергоресурсы и воду, но главное – повысить качество конечной продукции и сделать его стабильно высоким.

Повышенная влажность зерна после ГТО должна быть снижена до значений, требуемых по ГОСТу (13,5–15,5 %). Кондиционная влажность зерна, поступающего на размол, достигается за счет сушки. Правильно организованный процесс сушки позволяет сохранить и повысить качество сырья, улучшить его качественные и технологические показатели: снизить энергозатраты на размол, повысить белизну муки и увеличить срок ее хранения.

В отличие от крупных промышленных предприятий, в поточно-технологических линиях по переработке зерна малых предприятий (до 30 т/сут.) отсутствуют сушилки после бункеров для отволаживания. Их дополнительная установка сложна и удорожает технологический процесс.

Обзор технических решений по вопросам подготовки зерна к помолу показывает, что большинство фирм-производителей малогабаритных поточно-технологических линий для переработки зерна используют шелушильно-шлифовальные машины типа А1-ЗШН-3, которые работают, используя механический способ воздействия на зерно пшеницы – трение и сжатие. Поэтому наиболее эффективной представляется разработка комбинированных машин для ше-

лушения зерна, которые кроме своей главной функции – шелушения, при необходимости могут выполнять и дополнительные операции, например, подсушивание и обеззараживание. Машины будут легко встраиваться в стандартные поточно-технологические линии всех основных производителей малогабаритного оборудования для переработки зерна и стоить на порядок дешевле промышленных аналогов [1].

Для малых предприятий по переработке зерна мощностью до 30 т/сут. была разработана комбинированная вертикальная шелушильно-сушильная машина непрерывного действия с автоматической системой управления температурой и влажностью зерна, с инфракрасным (ИК) энергоподводом [2, 3].

Недостатком этой машины для реализации ИК-сушки, описанным в работах [2, 3], является использование в качестве источников нагрева зерна инфракрасных излучателей. Применение ИК-нагрева не позволяет нагреть материал до температуры обезвоживания при максимальной производительности из-за малого времени нахождения в рабочей зоне машины.

Для эффективного нагрева зерна за короткий промежуток времени необходимо вместо традиционных для пищевой промышленности способов сушки (сублимационной, вакуумной, инфракрасной) использовать современные инновационные способы воздействия сверхвысокочастотным (СВЧ) и электромагнитным полем (ЭМП). Опыт исследователей показывает, что использование СВЧ в комбинации с сушкой при пониженном давлении наиболее эффективно при обработке термолабильных материалов.

Особенностью СВЧ-нагрева является так называемый объемный нагрев, т.е. тепло генерируется сразу во всем объеме материала вследствие взаимодействия ЭМП с молекулами воды, находящимися во влажном материале. Кроме того, СВЧ-нагрев является безынерционным, т.е. тепловое воздействие включается и выключается



практически мгновенного, при этом коэффициент полезного действия преобразования СВЧ-энергии в тепловую более 80 %. Вышеописанные особенности позволяют упростить и повысить эффективность регулирования процесса сушки по температуре [5,6].

Дополнительно повысить эффективность СВЧ-сушки можно за счет комбинирования его с вакуумированием рабочей камеры для снижения температуры сушки. Преимущество данного подхода заключается в щадящем эффекте при обработке органических растительных материалов, для которых предельная температура нагрева является важнейшим аспектом, влияющим на качество конечной продукции.

Схема поэтапного процесса подготовки зерна к помолу на малых предприятиях представлена на рис. 1.

С энергетической точки зрения, СВЧ-сушка гораздо менее затратная по сравнению с конвективными способами сушки. Это достигается за счет того, что энергия, подводимая ко всему объему объекта нагрева, позволяет быстро доставить воду из внутренних слоев на поверхность, не изменяя общего влагосодержания (при этом нагрев продукта минимален), а механическое удаление воды с поверхности, в режиме фильтрационного обезвоживания происходит при минимальном снижении температуры поверхности зерновки [9, 10].

Вышеприведенное свидетельствует, что организация сушки полев СВЧ осуществима без обязательного полного парообразования.

Современная промышленность осваивает СВЧ и электромагнитные технологии уже достаточно давно (например, при сушке древесины), однако в пищевом секторе мало инновационных предприятий, разрабатывающих оборудование, работающее на этом принципе. В России это такие предприятия, как «Аграрные сверхвысокочастотные технологии» (ООО «АСТ», (Таганрог), Ньютехагро (Воронеж), «ЭкоМашСервис» (Новокузнецк). Среди зарубежных стран Китай наиболее активно развивает инновационный рынок микроволнового и электромагнитного оборудования (G.M.I. Timber & Machinery (Liaoning) Limited и др.).

Схема экспериментальной установки. Для проведения комплексных экспериментальных исследований была создана установка, состоящая из герметичной микроволновой камеры

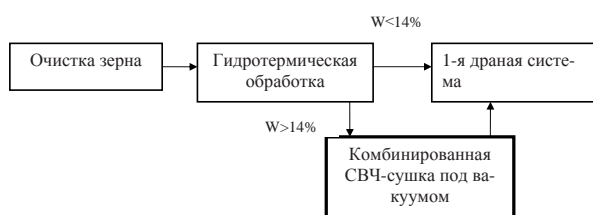


Рис. 1. Схема процесса подсушивания зерна при подготовке к помолу

с радиальным вентилятором, магнетроном мощностью 1000 Вт и электронными весами. Объектом исследования служило зерно пшеницы мягких сортов, размещенное плотным слоем, разной толщины, в рабочей зоне камеры.

Автоматизированная система управления (АСУ) установки построена на основе приборов фирмы «ОВЕН»: измерителя регулятора МПР-51-Щ4, датчиков температуры (термосопротивление ТСМ-50 и пирометр), влажности («Фауна»), давления (ПД100), весов электронных KERN, а также компьютера, позволяющего проводить гибкое конфигурирование системы сбора и обработки информации (рис. 2).

Программа исследований включала в себя несколько серий опытов с различной толщиной слоя зерна (массой), различной мощностью работы магнетрона и различным давлением рабочей камеры. Результаты измерения температуры слоя зерна и температуры выходящего из камеры воздуха, а также массы зерна, фиксировались АСУ экспериментальной установки.

Перед началом работы установки с помощью конфигуратора задаются значения установок в ОВЕН МПР-51-Щ4 как по температуре нагрева зерна $t_{\text{зад.макс}}$ и $t_{\text{зад.мин}}$, так и по времени нагрева. Опрос датчиков, подключенных к измерителю-регулятору, задается с учетом необходимой точности измерения. Работа АСУ на базе МПР-51 подробно описана в работах [2, 3].

Значение влажности, массы, температуры зерна и выходящего из установки воздуха при различных режимах сушки архивируются на жестком диске компьютера. Для связи прибора с компьютером используется адаптер сети ОВЕН АС4, преобразующий сигналы интерфейса RS 485 в USB и обратно и OPC – сервер OWEN.

В непрерывном режиме компьютер обрабатывал информацию, которая поступала от электронных весов, термопар, пирометра, и выводил на монитор линии трендов температуры зерна, воздуха в камере, влажности воздуха, выходящего из камеры. Поступающие данные обрабатывались программным комплексом *Statistica 10.1*.

Для визуального отображения параметров технологического процесса на экране компьюте-

Структурная схема управления экспериментальной установкой



Рис. 2. Схема системы управления сушкой зерна на базе измерителя-регулятора МПР-51-Щ4





ра, контроля и архивации данных использовали программу SCADA SIMP Light. Для визуализации процесса работы установки в ней была создана мнемосхема управления. Образец отчета с журналом тревог приведен на рис. 3.

В ходе проведенных опытов были получены зависимости скорости обезвоживания от толщины слоя зерна в рабочей камере, от мощности излучения и от степени разрежения в камере.

На рис. 4–6 представлены линии сушки при различной толщине слоя зерна в камере и максимальной мощности излучателя (1000 Вт).

Зерно пшеницы в рабочей зоне камеры размещали толщиной от 2,5 до 8 см (диапазон толщины слоя выбран исходя из размеров рабочей зоны разрабатываемой машины и ее производительности), облучали СВЧ-излучением различной мощности. Влагосодержание зерна фиксировали и представлены в виде зависимостей изменения влагосодержания зерна пшеницы от фиксированной мощности излучения магнетрона (см. рис. 4). Как показали результаты экспериментов, при снижении мощности излучения скорость процесса снижается пропорционально.

Анализ полученных данных позволил определить, что процесс сушки состоит из двух фаз – начальной, в процессе которой зерно нагревается (величина его составляет от 20 до 120 с, длительность пропорционально зависит от толщины слоя материала). Далее идет фаза самой сушки, причем влажность слоя материала уменьшается почти линейно. Длительность сушки для наибольшей толщины слоя составила около 220 с.

Эффективность микроволновой сушки, по сравнению с устаревшими способами, показывают термограммы процесса нагрева зерна в зависимости от толщины слоя и мощности СВЧ-излучения. В ходе каждой серии проведенных опытов пирометром фиксировали температуру зернового слоя. На рис. 5 представлены термограммы для толщины слоя $S = 5$ см.

Слой зерна толщиной $S = 5$ см нагрелся до своей максимальной температуры 58°C за 140 с при полной мощности магнетрона (1000 Вт). Слой толщиной $S = 2,5$ см достиг предельно допустимой температуры 60°C уже на 45-й с а через 75 с его температура превысила 100°C .

Экспериментальные данные позволили построить зависимости скорости сушки от мощности магнетрона в камере нагрева. Мощность изменялась стандартным встроенным регулятором СВЧ-печи, магнетрон работал в импульсном режиме. На рис. 6 представлен график скорости сушки при максимальной мощности магнетрона $P = 1000$ Вт.

Полученные графики описывают динамику процесса сушки и дают возможность оценить изменения ее скорости. Анализ данных показывает, что скорость сушки существенно не снижается на всем протяжении и прямо пропорционально зависит от мощности СВЧ-излучения.

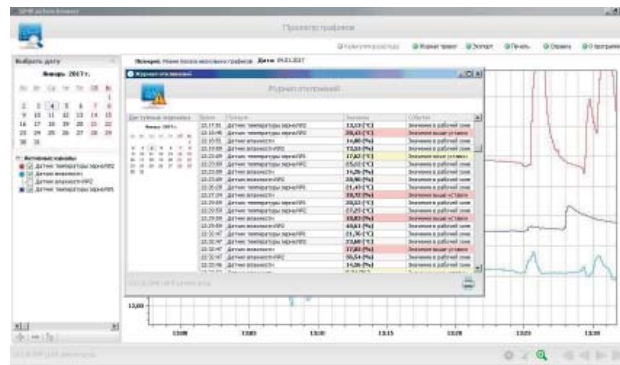


Рис. 3. Модуль просмотра графиков программы SIMP Light и журнал «тревог»

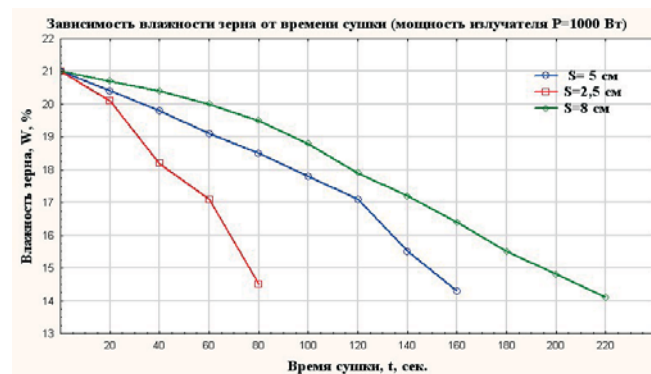


Рис. 4. Зависимость влажности зерна от времени сушки (мощность излучателя $P = 1000$ Вт)

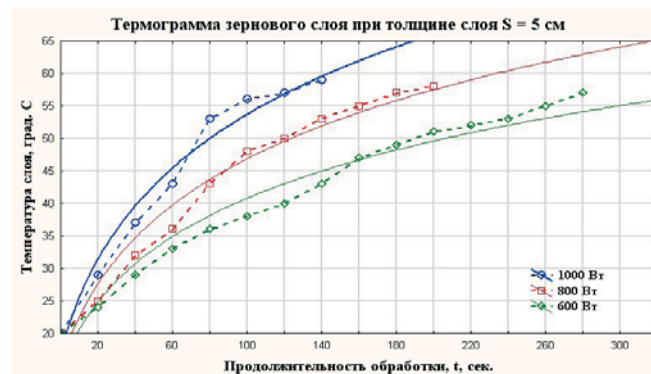


Рис. 5. Термограмма зернового слоя при толщине слоя $S = 5$ см

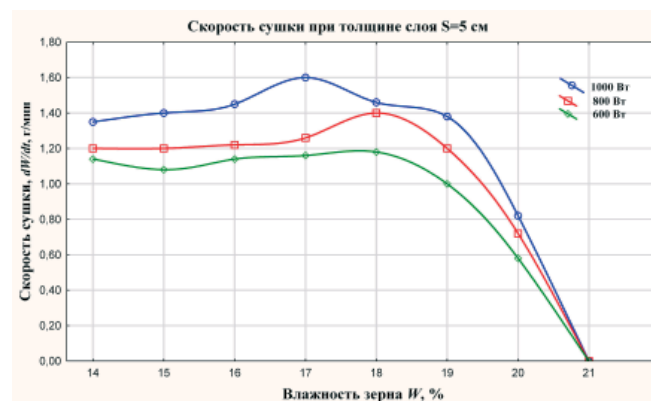


Рис. 6. Кинетика сушки пшеницы в микроволновом поле

В целях проверки теоретических данных о повышении эффективности влагоудаления при пониженном давлении воздуха серия опытов была проведена при пониженном давлении воздуха рабочей камеры, которое создавалось откачивающим вентилятором. Герметичность раз-



рабочанной установки и мощность встроенного вентилятора позволяют понизить давление воздуха в камере с атмосферного 100 до 85 кПа.

Полученные данные показывают, что снижение давления в камере до 85 кПа сокращает время сушки со 160 до 140 с (при толщине слоя $S = 5$ см и мощности магнетрона 1000 Вт), рис. 7.

Данные, полученные в ходе экспериментальной части исследований, подтвердили теоретические предпосылки целесообразности изготовления экспериментальной шелушильно-сушильной установки на основе СВЧ-излучателей (рис. 8) [9].

За основу для построения установки принята вертикальная шелушильно-сушильная установка с ИК-излучением [8]. Машина позволяет постоянно шелушить зерно и в случае необходимости подсушивать за счет СВЧ-энергоподвода. Встроенный вентилятор позволяет создавать разрежение внутри машины.

Проведенные исследования были проведены по договору с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (№180ГС1/6784 от 25.12.2014) по программе «СТАРТ» совместно с ООО «Здоровое питание» [4].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Микроволновые технологии в настоящее время являются одними из самых эффективных для нагрева продукта.

Разработана экспериментальная установка для СВЧ-сушки зерна с автоматизированной системой управления на основе приборов фирмы «ОВЕН».

Анализ результатов проведенных предварительных экспериментальных исследований позволяют сформулировать требования к изготовлению и функционированию установки для подсушивания зерна при подготовке к помолу при комбинированном импульсном воздействии микроволновым полем и вакуумированием рабочей зоны. Производительность установки следует связать с мощностью микроволнового излучения, а его время воздействия должно быть разным для фаз прогрева зерна до температуры обезвоживания и самой сушки. Во время последней время и мощность микроволнового излучения должны ограничиваться максимально допустимой нагрева зерна (60 °С).

Результаты экспериментов подтвердили перспективность предложенных технических решений для СВЧ-подсушивания зерна пшеницы, при этом вакуумирование рабочей зоны является дополнительным фактором интенсификации процесса сушки.

Предложенные принципы и схема машины требуют дополнительно ряда технических и конструкторских решений для обеспечения требуемого качества обработки зерна и безопасности технологического процесса.

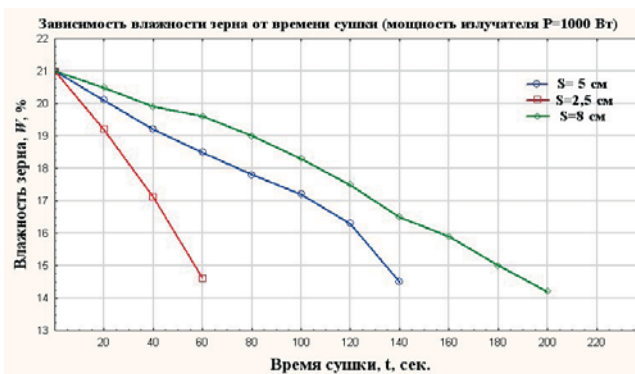
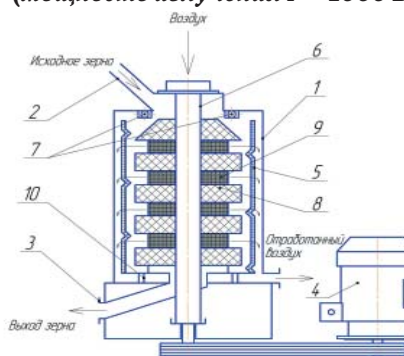


Рис. 7. Зависимость влажности зерна от времени сушки при вакуумировании рабочей камеры (мощность излучения $P = 1000$ Вт)



1 – корпус; 2 – загрузочный патрубок; 3 – выпускной патрубок; 4 – электродвигатель; 5 – стальной цилиндр; 6 – лопытки с твердостью; 7 – СВЧ-излучатели; 8 – абразивные круги; 9 – стальные обечайки; 10 – вентилятор

Рис. 8. Шелушильно-сушильная машина с СВЧ-излучением

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов А.В. Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2012. – № 8. – Вып. 4. – С. 38–43.
- Анисимов А.В. Система автоматического управления температурой и влажностью при подготовке зерна к помолу // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2013. – № 10. – С. 44–47.
- Анисимов А.В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 6. – С. 53–56.
- Анисимов А.В., Анисимова М.С., Сивицкий Д.В. Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу / Отчет о НИОКР, рег. № НИОКР 115082610022, 14.12.2015. – 65с.
- Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Энергетический аспект // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов: труды Междунар. науч.-тех. сем. – Воронеж, 2010. – С. 478–487.
- Васильев А.Н., Будников Д.А., Смирнов Б.Г. Эффективность применения поля свч для интенсификации сушки зерна активным вентилированием // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 7. – С. 29–30.
- Пат. 161834 Российская Федерация, МПК⁷ В02В1/06. Шелушильно-сушильная машина с СВЧ-излучением / Анисимов А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Здоровое питание». – № 2012104970; заявл. 26.01.2016; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – 7 с.: ил.



8. Пат. 2491124 Российская Федерация, МПК⁷ В02В3/02. Шелушильно-сушильная машина / Анисимов А.В., Богданова М.С.; заявитель и патенто-обладатель Саратовский гос. аграрный ун-т имени Н.И.Вавилова. - № 2012104970; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. - 7 с.: ил.

9. *Файзрахманов Ш.Ф.* Применение СВЧ для сушки сельскохозяйственной продукции // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции Лапшинские чтения: материалы IX Международ. науч.-практ. конф. - 2013. - С. 369-371.

10. *Шушков Р.А., Бирюков А.Л., Кустов Д.В.* Обоснование целесообразности использования СВЧ-излучения для сушки льнотресты в ленте // Молочно-зайцевский вестник. - 2016. - № 4. - С. 99-112.

Анисимов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология производства и переработки продукции животноводства», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия. 410005, г. Саратов, ул. Соколова, 335. Тел.: (8452) 69-25-31.

Ключевые слова: гидротермическая подготовка; влажность зерна; инфракрасная сушка; измеритель-регулятор; автоматизация.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE PROCESS MICROWAVE GRAIN DRYING IN PREPARATION FOR GRINDING

Anisimov Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the chair "Technology of Production and Processing of Livestock Products", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Keywords: hydrothermal treatment; grain moisture; infrared drying; meter-controller; automation.

There has been made an experimental facility for research the process of microwave grain drying with multi-

functional system of technological process control and information saving application, on the basis of devices of OVEN firm: meter-controller MPR-51-SH4 and interface adapter AC4. The block diagram of the improved control system of drying grain is given. Its features, working principle and methodology of experimental research are described. Experimental studies on shelling and drying installation are conducted. The tests results of the band are presented.

УДК 621

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕМОНТУ УЗЛОВ УПЛОТНЕНИЯ

НИКИТИН Дмитрий Анатольевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

МЕЖЕЦКИЙ Геннадий Дмитриевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ДЕНИСОВ Александр Сергеевич, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

АСОЯН Артур Рафикович, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

НИКИТИН Павел Дмитриевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ЧЕКМАРЕВ Василий Васильевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

Проанализированы тенденции современного двигателестроения и выявлено, что в настоящее время производство дизелей с наддувом составляет от 50 до 90% от общего объема выпускаемых двигателей и количество турбированных дизелей растет. Вместе с этим новые турбокомпрессоры при соблюдении эксплуатационных требований вполне удовлетворительно обрабатывают свой паспортный ресурс, чего нельзя сказать о турбокомпрессорах, подвергшихся ремонту. В этом случае даже в начальный период эксплуатации у них наблюдается повышенный расход масла, а наработка на отказ, как правило, не превышает 50% от наработки нового турбокомпрессора. На основании причин отказов турбокомпрессоров сделан вывод о том, что причиной до 88% всех отказов турбокомпрессоров является неудовлетворительная работа узла уплотнения. Анализ износного состояния деталей узла уплотнения показал, что нарушение работоспособности узла уплотнения происходит по причине проворота уплотнительных колец. Предложена методика расчета формы уплотнительных колец турбокомпрессоров, гарантирующая их работоспособность даже при самых неблагоприятных условиях эксплуатации. Испытаниям были подвергнуты 4 восстановленных турбокомпрессора, укомплектованных экспертными кольцами, в составе двух капитально отремонтированных двигателей. В качестве параметра технического состояния турбокомпрессора принимался зазор в сопряжении «уплотнительное кольцо – канавка», определяющий работоспособность узла уплотнения и турбокомпрессора в целом. Результаты испытаний показали, что прогнозируемый срок службы ТКР составит не менее 440 200 км пробега, что находится на уровне ресурса капитально отремонтированного двигателя и составляет до 88 % ресурса нового двигателя.

Основным агрегатом системы наддува является турбокомпрессор (ТКР). Его надежность сказывается на надежности двигателя

в целом, затратах на запасные части и ремонт, поэтому повышение надежности турбокомпрессоров и разработка экономически эффективных