

Рекуператоры тепла вентиляционного воздуха «ТеФо» в зимний период

Автор В.Г. БАРОН, к.т.н., директор ООО «Теплообмен» (г. Севастополь)

Рекуператоры тепла вентиляционного воздуха предназначены для обеспечения энергосбережения при осуществлении воздухообмена в помещениях. Наиболее остро этот вопрос встает в период зимней эксплуатации, когда разница температур наружного и внутреннего воздуха достигает наибольших значений. В это время года и потребительские свойства рекуператоров (нагрев поступающего наружного воздуха), и их экономические свойства (экономию энергии) становятся наиболее востребованными. Но именно в этот период появляется обусловленная естественными условиями причина, способная радикально ухудшить тепловую эффективность функционирования рекуператора. Причина состоит в том, что на теплопередающей поверхности рекуператора со стороны теплого (удаляемого из помещения воздуха) возможно образование «шубы» инея.

Эта «шуба», обладая низким коэффициентом теплопроводности, потенциально способна сделать бессмысленным

использование рекуператора, практически исключив в нем подогрев поступающего воздуха за счет утилизации тепла удаляемого воздуха.

Для борьбы с данным негативным явлением в некоторых конструкциях рекуператоров вводятся предвключенные ТЭНы, которые подогревают поступающий морозный воздух до температур, исключающих намерзание инея на теплопередающих поверхностях.

Однако, такое конструктивное решение, во-первых, частично меняет саму суть рекуператоров, превращая их в некоторой мере в электрический подогреватель поступающего воздуха и, во-вторых, снижает тепловую эффективность непосредственно рекуператора, т.к. наружный воздух, поступающий на рекуператор после прохождения предвключенного ТЭНа, имеет уже повышенную против исходной температуру, что, ввиду уменьшившегося таким образом температурного напора, снижает тепловую эффективность рекуперативного теплообмена в изделии.

Вопрос о возможном намерзании инея на теплопередающих поверхностях выпускаемых нами децентрализованных рекуператоров тепла вентиляционного воздуха «ТеФо» нередко задают и нам, тем более, что в конструкции наших рекуператоров не предусмотрено никаких устройств для предварительного подогрева наружного воздуха. Дать корректный и однозначный ответ на такой вопрос не представляется возможным, т.к. динамика намерзания инея в рекуператоре зависит не только от его конструкции, но и от массы взаимозависимых и произвольно сочетающихся между собой в каждом конкретном случае факторов. Основными из них являются: исходная степень рекуперации данного изделия, температура наружного воздуха, соотношение расходов удаляемого и поступающего воздуха, абсолютное значение расхода удаляемого воз-

духа, температура, а также относительная влажность воздуха в помещении. Однако, некоторые качественные оценки этого процесса очевидны и были приведены нами еще на стадии разработки технической документации на рекуператоры «ТеФо». В частности, в «Техническом описании и Инструкции по эксплуатации «ТеФо» в п. 2.5.3 записано: «Процесс инееобразования при базовых расходах удаляемого и подаваемого воздуха, как правило, вообще не наблюдается при температурах наружного воздуха, превышающих $-10\text{--}15^\circ\text{C}$ »; и далее: «Процесс намерзания льда, как правило, носит пульсирующий около некоторого значения толщины наледи характер («шуба») увеличивается до определенных размеров, после чего увеличение скорости потока теплого воздуха, с одной стороны, и уменьшившаяся из-за обледенения теплопроводность стенки, с другой стороны, приводят к остановке процесса намерзания и некоторому его обратному течению и т.д., благодаря чему процесс колеблется около некоторого положения равновесия)... Если же, ввиду неблагоприятного сочетания факторов, обмерзание будет развиваться даже до смыкания ледяных корок соседних трубочек вплоть до полного перекрытия проходного сечения удаляемого воздуха, то ни к каким опасным последствиям это привести не может. В этом случае рекуператор просто прекратит функционировать в качестве такового и превратится в обычный канал для подачи наружного воздуха. После оттайки образовавшейся наледи рекуператор полностью восстановит свои первоначальные свойства. Достижение такого, безусловно нежелательного, режима, как правило, не вызывает дефектов самого рекуператора».

К настоящему времени появились некоторые фактические данные, позволяющие с качественной точки зрения подтвердить справедливость указаний, приведенных в «Техническом описании», а также количественно охарактеризовать динамику снижения степени рекуперации из-за образования «шубы» инея. В настоящей

статье проанализированы результаты эксплуатации по прямому назначению рекуператоров «ТеФо» в зимний период 2008–2009 гг., а также дана аналитическая обработка результатов периодических испытаний одного из серийных рекуператоров «ТеФо» в климатической камере.

Результаты эксплуатации рекуператоров «ТеФо» в зимний период 2008–2009 гг.

Представилось возможным проанализировать работу двух рекуператоров «ТеФо» по итогам зимней эксплуатации 2008–2009 гг. Один из рекуператоров был установлен в жилом помещении в Санкт-Петербурге, второй — в офисном помещении в г. Прокопьевске Кемеровской обл.

Микроклимат в жилом помещении в Санкт-Петербурге, где был установлен рекуператор, обеспечивался с помощью дополнительных средств климатизации и характеризовался повышенной влажностью и повышенной температурой (относительная влажность находилась на уровне 50% при температуре порядка $23\text{--}24^\circ\text{C}$). Длительная и непрерывная круглосуточная эксплуатация этого рекуператора при характерных для Санкт-Петербурга в этот период года температурах не вызывала никаких изменений в характеристиках работы рекуператора до тех пор, пока температура наружного воздуха не опустилась до отметки ниже -15°C . При произошедшем в конце января 2009 г. понижении температуры наружного воздуха до -20°C на наружной стене здания было визуально обнаружено образование наледи, спускающейся вниз, начиная от нижней образующей выходного патрубка рекуператора.

Необходимо особо подчеркнуть, что этот эффект (образование наледи на выходе патрубка из стены) не является одной из особенностей, присущих именно рекуператорам «ТеФо», а определен законами природы и будет характерен для работы абсолютно любого рекуператора, обладающего более-менее неплохой тепловой эффективностью (конечно, при степени рекуперации, например, 10% — если кому-то придет в голову сделать рекуператор с такой бессмысленно низкой эффективностью, — наледь может и не образоваться). Это легко увидеть, обратившись к таблицам, содержащим сведения о свойствах влажного воздуха. В частности, при температуре воздуха в помеще-

нии 24°C и относительной влажности 50% в 1 кг воздуха содержится 9,3 г водяных паров, а при температуре воздуха -4°C , т.е. при той температуре, которая будет на выходе из рекуператора при степени рекуперации 70% и вышеуказанных температурах на улице и в помещении, в 1 кг воздуха не может содержаться более 2,8 г водяных паров. Таким образом, при расходе воздуха на уровне $30\text{ м}^3/\text{ч}$ (т.е. примерно $37\text{ кг}/\text{ч}$) каждый час из рекуператора вместе с выходящим на улицу потоком 100% влажного воздуха будет выходить в виде жидкой фазы (подчеркиваем — не в виде паров, а именно в виде жидкой фазы) примерно 240 мл воды. Попав на наружную кромку стены, имеющую температуру существенно ниже 0°C , эта вода, естественно, превращается в лед.

Учитывая, что рекуператор в описываемом случае был расположен вертикально, и поэтому его патрубок забора наружного воздуха находился на стене здания строго внизу по отношению к выходному патрубку, входное отверстие патрубка забора воздуха оказалось частично перекрыто спускающейся наледью, что уменьшило подачу свежего воздуха, правда, при одновременном повышении температуры последнего.

В офисном помещении в Прокопьевске никаких специальных устройств климатизации, призванных искусственно поддерживать измененные параметры воздуха, не применялось. Согласно информации, полученной от людей, работавших в этом офисе, в процессе функционирования рекуператора наблюдалась следующая картина. При температуре наружного воздуха на уровне -20°C на наружной поверхности теплопередающих трубочек в районе выхода из рекуператора удаляемого из помещения воздуха, примерно через 1,5–2,0 ч от момента включения рекуператора появлялась белесоватая пленка инея. Эта пленка, согласно визуальным наблюдениям, продолжала нарастать в течение еще нескольких часов, и к середине рабочего дня ее толщина стабилизировалась около некоего псевдостационарного значения. При этом ее толщина была такой, что ее наличие не оказывало заметного влияния на характеристики рекуператора (температура поступающего в помещение наружного воздуха контролировалась спиртовым термометром).

Помимо эксплуатации в описанном штатном режиме сотрудниками офи-

са был проведен эксперимент с целью определить, как повлияют длительно воздействующие экстремально низкие температуры наружного воздуха на работоспособность рекуператора. Для этого в период стояния наибольших холодов (температура опустилась до уровня -40°C) рекуператор был включен в начале рабочего дня и не выключен после его завершения, таким образом, рекуператор работал сутки при температуре наружного воздуха -40°C и температуре воздуха в помещении 20°C . Утренний осмотр рекуператора на следующий день показал, что выходное сечение патрубка для выхода удаляемого из помещения воздуха оказалось практически полностью перекрыто толстой «шубой» инея. Включение режима «оттайка» позволило довольно быстро растопить образовавшийся иней и ввести рекуператор в режим нормального функционирования.

Никаких негативных последствий на работоспособность рекуператора этот эксперимент не имел — все детали и узлы рекуператора сохранили целостность и свои первоначальные геометрические размеры, и потребительские свойства самого рекуператора также в процессе эксперимента не изменились.

Визуальные наблюдения за работой этих двух рекуператоров очень хорошо согласуются с теоретическими предположениями, сформулированными нами в процессе создания рекуператоров и изложенными, как отмечено выше, в «Техническом описании и Инструкции по эксплуатации рекуператоров «ТеФо».

Анализ двух вышеописанных примеров использования рекуператоров «ТеФо» в условиях достаточно низких температур позволяет сделать ряд оснований на опыте эксплуатации практических выводов.

1. До температур наружного воздуха не ниже -15°C никаких изменений в нормальном функционировании рекуператоров «ТеФо» не происходит. Таким образом, можно утверждать, что, если рекуператор предназначен для эксплуатации в районах с расчетной зимней температурой на уровне -14°C – -15°C , то никаких специальных, т.н. «зимних» функций в такой рекуператор встраивать не нужно.

2. При вертикальном расположении рекуператора и возможности понижения температуры наружного воздуха до значений ниже -15°C возможно образование наледи, спускающейся вниз от вы-

ходного патрубка рекуператора. По этой причине необходимо либо принять меры по защите нижележащего патрубка забора наружного воздуха, например, путем устройства козырька над ним, либо вывести выходной патрубок с выпуском примерно на 60–70 мм из стены, с тем, чтобы образующаяся наледь свисала с него в виде сосульки и не перекрывала входное сечение патрубка забора воздуха.

3. При создании условий, способствующих образованию существенной «шубы» инея, т.е. если температура наружного воздуха может длительно опускаться ниже -20 – -22°C , рекуператор должен снабжаться кнопкой «оттайка».

Следует отметить, что такую кнопку, предусматривающую выключение только вентилятора, подающего наружный воздух, мы в прежние годы предусматривали по умолчанию на всех рекуператорах, но, как показывал предыдущий опыт эксплуатации рекуператоров (а до зимы 2008–2009 гг. рекуператоры не эксплуатировались в регионах с возможным длительным снижением температур ниже -25°C , необходимости в ней не возникало, и мы оставили эту функцию в качестве дополнительной опции, встраиваемой по отдельному согласованию. По итогам вышеописанной зимней эксплуатации в Прокопьевске принято решение изменить уровень приоритета функции «оттайка» — теперь, как в первые годы выпуска нами рекуператоров, она предусматривается по умолчанию и, только если известно, что регион, где предполагается эксплуатация изделия, имеет расчетную зимнюю температуру выше -12°C , эта функция вводиться не будет.

Аналитическое описание динамики образования «шубы» инея

Вышеописанные наблюдения, проведенные на двух рекуператорах во время их эксплуатации по прямому назначению при суровых зимних температурах, позволили получить качественное описание функционирования рекуператоров в этих условиях и сформулировать некоторые полезные выводы. Однако было небезынтересно получить не только качественную картину, но и количественное описание процессов замерзания инея на теплопередающих трубах рекуператора.

Для этого имеются необходимые фактические данные. В ходе периодических испытаний в декабре 2006 г. одно-

го из серийных рекуператоров «ТеФо» в сертифицированной климатической камере были получены необходимые данные, позволяющие вывести математические зависимости, описывающие динамику образования «шубы» инея на поверхности трубок, но, к сожалению, на базе относительно непродолжительного отрезка времени. Однако представлялось нецелесообразным опубликовать эти количественных характеристик процесса инееобразования до получения их подтверждения в натуральных условиях — пусть качественного, но хорошо коррелирующегося с полученным в эксперименте результатом. После получения сведений об итогах эксплуатации двух вышеописанных рекуператоров, которые полностью соответствуют ожидаемым результатам, можно представить полученные в ходе экспериментов данные.

Условия эксперимента (рис. 1):

- вывод температуры с термопар на приборную стойку;
- изменение расхода воздуха крыльчатым анемометром и электронным секундомером;
- изменение влажности в теплом отсеке психрометром Августа;
- возможность визуального контроля за образованием и оттаиванием «шубы» инея ввиду того, что патрубок выхода удаляемого воздуха был расположен в теплом отсеке климатической камеры.

Средствами автоматизации климатической камеры температуры в холодном и теплом отсеке поддерживались соответственно в районе 18°C и -22°C , а относительная влажность в теплом отсеке на уровне 70 %.

Результаты испытаний с отметками по времени приведены в табл. 1. Там же (две крайние справа колонки) указаны значения степени рекуперации ϵ для каждой точки замера и время Δt , прошедшее до момента данного замера от начала включения рекуператора. Однако, для времени 14:15 в последней колонке приведено не время, а расчетная степень рекуперации, причины чего пояснены чуть ниже, а для времени 15:00 соответствующая клетка в последней колонке не заполнена вовсе в связи

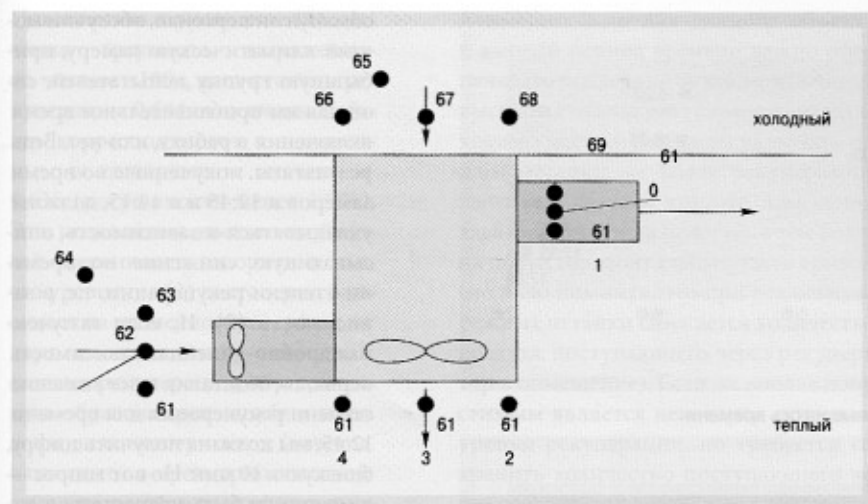


Рис. 1. Схема связей в единой технологической системе здания

Результаты испытаний

табл. 1

№	Время замера	$V, \text{ м}^3/\text{ч}$	$t_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{\text{в}}, \text{ ккал/ч}$	$t_{\text{г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	ϵ	Лт. мин. $\epsilon_{\text{расч}}$
1	12:45	86,0	-23,0	7,5	848,3	18,25	0,739	7,7 (расч)
2	14:15	86,0	-20,32	4,2	682,0	18,32	0,635	0,644
3	15:00	86,0	-23,58	6,44	834,4	18,01	0,722	-
4	16:30	86,0	-23,24	8,74	890,0	18,08	0,774	5
5	16:33	86,0	-22,84	6,86	826,1	17,73	0,732	8
6	17:25	86,0	-24,9	2,58	787,7	16,92	0,657	60
7	17:28	86,0	-24,49	2,5	751,0	16,79	0,654	63
8	17:35	86,0	-23,86	2,41	730,7	16,93	0,644	70
9	17:38	86,0	-21,92	4,13	723,2	18,76	0,64	73

с тем, что параметры этой точки были достигнуты в результате неполной оттайки, начатой с некоторой произвольной степени намерзания инея.

Степень рекуперации (по сути — степень энергосбережения рекуператора) рассчитывалась как отношение разности температур холодного воздуха на входе и выходе (абсолютное значение нагрева холодного воздуха) к разности температур холодного и теплого воздуха на входах в рекуператор:

$$\epsilon = \frac{\Delta t_x}{\Delta t_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где ϵ — степень рекуперации; $\Delta t_x = t_{x2} - t_{x1}$, $^\circ\text{C}$ (t_{x1} и t_{x2} — соответственно, температуры наружного воздуха на входе в рекуператор и на выходе из него); $\Delta t_{\text{вх}} = t_{r1} - t_{x1}$, $^\circ\text{C}$ (t_{r1} — температура удаляемого воздуха на входе в рекуператор).

Для наглядности на рис. 2 графически показаны эти значения степени рекуперации, положенные на ось времени.

На первый взгляд хаотический и существенный разброс значений степени рекуперации одного и того же рекуператора, работающего в более-менее идентичных условиях, обескураживает. Однако, если на ось абсцисс нанести засечки во времени, позволяющие соотнести ту или иную точку с особенностями съема параметров в этой точке благодаря учету дополнительной информации о режиме проведения испытаний (на рис. 2 эти засечки уже нанесены и располагаются около соответствующих точек), то этот разброс уже становится не хаотическим, а детерминированным.

Дополнительная информация о режиме проведения испытаний такова.

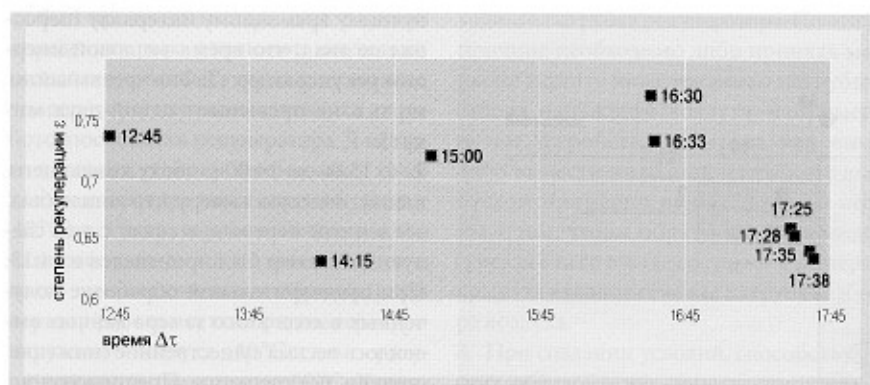
1. В 12:45 группа испытателей прибыла на стенд в заранее обусловленное время и обнаружила рекуператор уже функционирующим. Был осуществлен замер. По словам персонала, обслуживающего климатическую камеру, они включили рекуператор примерно за 10 мин. до назначенного времени, чтобы убедиться в работоспособности средств измерения, и к моменту начала испытаний уже прошло время тепловой инерции, обычно принимаемое равным примерно 10-ми-

нутному временному интервалу (персонал не знал, что время тепловой инерции рекуператора «ТеФо» чрезвычайно мало и не превышает одной-двух минут).

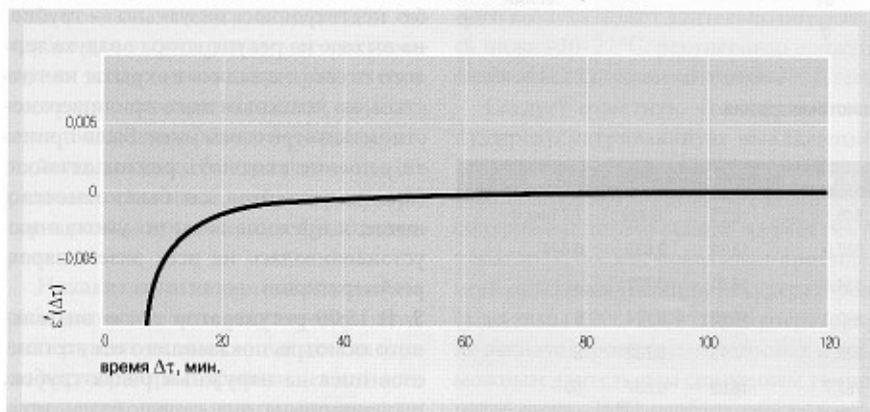
2. С 13:00 до 14:00 у обслуживающего климатическую камеру персонала был обеденный перерыв, в связи с чем следующий замер был произведен в 14:15. При предварительной обработке полученных в ходе этого замера данных выявилось весьма существенное снижение степени рекуперации. Предположение об образовавшейся за полтора часа «шубе» подтвердилось визуально — трубки на выходе из рекуператора воздуха теплого отсека оказались покрыты не толстым, но заметным даже при поверхностном осмотре слоем инея. Было принято решение включить режим оттайки (кнопка «оттайка», как было отмечено выше, в прежние годы по умолчанию устанавливалась на всех экземплярах рекуператоров).

3. В 15:00 рекуператор после визуального осмотра, показавшего отсутствие слоя инея на наружных рядах трубок, но наличие на них капель влаги, причем кое-где коагулирующих в сплошную водяную пленку, был включен в работу, и через несколько минут производился замер параметров. Обработка полученных в ходе этого замера данных показала, что степень рекуперации заметно выросла по сравнению с предыдущим измерением, но оказалась все же ниже первоначально зафиксированной. Испытатели вновь осмотрели трубки в районе выходного патрубка и обнаружили, что не все капельки влаги испарились и были унесены потоком воздуха, на что испытатели рассчитывали, а, из-за малой степени тепловой инерции, частично замерзли, при этом имевшаяся кое-где водяная пленка превратилась в ледяную корочку. Было принято решение повторно включить режим оттайки.

4. В 16:30 после тщательного визуального осмотра теплопередающих трубок в районе выходного патрубка, показавшего полное отсутствие на поверхности трубок не только инея, но и влаги, рекуператор включен в работу, и спустя 2–3 мин. был проведен замер параметров. Необходимо подчеркнуть, что после полной оттайки рекуператора в его корпусе практически не было обнаружено талой воды (визуально было установлено наличие примерно 3–5 мл воды). Как и предполагалось,



■ Рис. 2. Значения степени рециркуляции, положенные на ось времени



■ Рис. 3. Графическое представление уравнения (3)

оттайка произошла через процесс сублимации, и молекулы воды, срываемые с верхних, нагреваемых потоком теплого воздуха слоев «шубы», были подхвачены турбулентным потоком воздуха и вынесены за пределы рекуператора.

5. В 16:33, в 17:25, в 17:28, в 17:35 и в 17:38 осуществлялся последовательный съем данных с работающего рекуператора.

6. В 17:45 у сотрудников испытательного стенда завершился рабочий день.

Из рассмотрения графика видно, что степень рециркуляции возрастала после оттайки и снова падала после включения рекуператора в работу. Но то, что это падение происходило существенно не равномерно, а с меняющейся во времени динамикой, становится очевидным, если, глядя на график, рассматривать только точки, лежащие правее отметки 16:30, т.е. анализировать только те значения, которые были получены с момента включения полностью оттаявшего и осушенного рекуператора до его остановки без каких-либо вмешательств в его работу (аналог его функционирования на объекте).

Использование математического аппарата численной обработки данных позволило подобрать уравнение, наи-

более точно аппроксимирующее полученные значения. Это оказалось уравнение дробно-линейной зависимости, выражающееся для данного типоразмера рекуператора в численном виде формулой:

$$\epsilon = \frac{0,6372498 \Delta t}{\Delta t - 1,063929}, \quad (2)$$

где Δt — время, прошедшее от момента включения рекуператора в работу, мин.

Получив уравнение, описывающее динамику снижения эффективности работы рекуператора при образовании на его трубках инея, можно выполнить анализ поведения полученной функции и посмотреть, где снижение тепловой эффективности происходит наиболее быстро, а где процесс снижения протекает значительно медленнее, что имеет не только теоретический интерес, но и практическое значение. Располагая такой информацией, можно дать практические рекомендации по использованию рекуператоров на объектах в зависимости от выбранной стратегии их использования. Но об этих практических рекомендациях несколько ниже, а сейчас хочется обратить внимание на возможность, располагая полученной функцией, методом обратного счета определить —

обманул ли персонал, обслуживающий климатическую камеру, прибывшую группу испытателей, сообщая им приблизительное время включения в работу, или нет. Ведь результаты, полученные во время замеров в 12:45 и в 14:15, должны укладываться в зависимость, описывающую снижение во времени степени рециркуляции, т.е. в зависимость (2). И, если полученная дробно-линейная зависимость верна, то, подставив в нее значение степени рециркуляции для времени 12:45, мы должны получить цифру, близкую к 10 мин. Но вот вопрос — а можно ли быть уверенным в достоверности описания динамики образования наледи в рекуператоре полученной дробно-линейной зависимостью и, с другой стороны, а является ли единственный замер, выполненный в 12:45 достаточно представительным, чтобы по нему одному судить о справедливости полученной зависимости. Дело в том, что значение, полученное в 12:45, базируется на очень небольшом временном интервале (10 мин.) и даже незначительная абсолютная погрешность в 1–2 мин. (а персонал не засекал время включения им рекуператора и лишь примерно сориентировал испытателей, сказав насчет 10 мин.) может привести в этой области изменения функции к значительной относительной ошибке и послужить источником неправильных умозаключений о корректной (или, наоборот, о некорректной) аппроксимации полученной аналитической зависимостью семейства экспериментальных значений. И тут неопределимую роль арбитра может сыграть значение степени рециркуляции, полученное в 14:15. Замер в этой точке отстоит от начала испытаний примерно на 100 мин., из которых 90 мин. прошли в присутствии группы испытателей. И если даже персонал ошибся на 2–3 мин. или даже на 5–6 мин., говоря о 10 мин., то эта ошибка мало повлияет на ту временную базу, которая принята для точки в 14:15 (она принята равной 100 мин. и складывается из 90 мин. работы рекуператора в присутствии испытателей и плюс 10 мин., сообщенных персоналом).

Подстановка в уравнение (2) значения аргумента, выраженное числом «100», дает степень рекуперации 0,644, что очень хорошо коррелирует с полученным в эксперименте значением 0,635 (погрешность менее 1,5%). Это позволяет с достаточной долей уверенности говорить о том, что уравнение (2) достоверно описывает на временном интервале до двух часов динамику изменения степени рекуперации, обусловленную образованием «шубы» инея в условиях эксперимента (хочется напомнить о чрезмерно высокой относительной влажности в теплом отсеке, равной 70%).

Теперь уже с достаточной уверенностью можно говорить о том, на сколько ошибся персонал, «на глаз» оценивая время, прошедшее от начала включения рекуператора до первого замера. Подстановка в уравнение (2) значения степени рекуперации, равного 0,739 дает значение аргумента, равное 7,7 мин., и говорит о хорошем чувстве времени у персонала стенда.

Убедившись в достаточно хорошем описании уравнением (2) динамики изменения степени рекуперации, можно использовать полученное уравнение для выработки правильной стратегии эксплуатации рекуператоров этого типа на объектах. Ответ на вопрос, связанный с выбором стратегии эксплуатации, кроется в осознании резко неравномерной во времени динамики изменения скорости снижения степени рекуперации.

Простой визуальный анализ расположения точек после времени 16:30 (см. рис. 2) показывает, что вблизи начала отсчета времени степень рекуперации падает стремительно, а с течением времени происходит замедление ухудшения тепловой эффективности рекуператора с выходом этой кривой на достаточно удаленном от начала эксплуатации отрезке времени к прямой линии, параллельной оси абсцисс (т.е. с выходом на псевдостабильный тепловой режим около некоей точки временного равновесия). Таким образом, вышеизложенное позволяет сформулировать вполне прагматичные рекомендации.

А именно, если для данного объекта в данный период времени важно обеспечивать поддержание как можно более высокой степени рекуперации, то необходимо достаточно часто включать режим оттайки, не давая рекуператору выйти из области крутого изменения характеристики на пологую, а тем более на почти горизонтальную часть кривой (но надо помнить, что при реализации режима оттайки снижается количество воздуха, поступающего через рекуператор в помещение). Если же вполне допустимым является некоторое снижение уровня рекуперации, но требуется сохранить количество поступающего через рекуператор воздуха, то следует придерживаться иной стратегии использования, прибегая к режиму оттайки достаточно редко.

Однако эти рекомендации пока носят не конкретный, а описательный характер. Имея целью получить возможность каким-то образом формализовать эти выводы, мы провели анализ поведения кривой, графически интерпретирующей уже не изменение степени рекуперации, а скорость изменения степени рекуперации. Для этого уравнение (2) было продифференцировано по времени и получено выражение (3), задающее вид искомой зависимости:

$$\epsilon' = -\frac{0,67799}{(\Delta\tau - 1,063929)^2} \quad (3)$$

где ϵ' — первая производная степени рекуперации по времени.

Уравнение (3) графически представлено на рис. 3.

Из рассмотрения рис. 3 видно, что наиболее стремительно степень рекуперации в эксперименте падала на протяжении первых 10–15 мин. с момента включения изделия в работу, затем наступает переходный период, в течение которого происходит быстрое уменьшение скорости падения степени рекуперации. Этот период длится примерно до отметки 30–35 мин. После него наступает достаточно длительный период псевдостабильности, измеряемый уже не минутами, а часами, на протяжении которого продолжается, но уже очень медленно, снижение тепловой эффективности рекуператора.

Таким образом, можно сделать вывод, что при условиях, близких к условиям эксперимента (что особенно важно подчеркнуть — в эксперименте поддерживалась неестественно высокая для зимних условий относительная влаж-

ность в помещении), надо либо каждые 25–30 мин. включать режим оттайки, если важно сохранить максимальную степень рекуперации, либо же, если вполне устраивает снижение степени рекуперации от 75% до уровня в 60%, но есть необходимость сохранять расчетный расход поступающего через рекуператор воздуха, прибегать к режиму оттайки достаточно редко (например, один раз в 4 ч или даже один раз в 8 ч).

Однако следует помнить, что эмпирически подобранные зависимости, удовлетворительно описывающие поведение тех или иных материальных объектов в границах проведенных экспериментов, не должны экстраполироваться на достаточно далеко выходящие за эти границы значения аргумента.

Полученные при таком подходе расчетные значения функции могут весьма существенно отличаться от реальных. Это наиболее актуально для областей, где происходит быстрое изменение функции в зависимости от изменения аргумента, и менее актуально (а потому позволительно применение более отдаленной экстраполяции) для областей, где функция меняется не столь стремительно. В рассматриваемом случае очевидно, что экстраполяция в сторону начала эксперимента от значения аргумента, равного «5», практически недопустима даже на 1 мин., но в то же время вполне позволительной является экстраполяция в сторону увеличения аргумента на величины, измеряемые даже не десятками минут, а несколькими часами (по крайней мере, зависимость, для получения которой было использовано крайнее значение аргумента «73», дала хорошее совпадение с экспериментально полученным значением функции при значении аргумента «100»).

Проведенный совместный анализ сведений, полученных с объектов реальной эксплуатации рекуператоров (качественные характеристики работы рекуператоров в условиях низких температур), и данных натурных экспериментов (количественное описание работы рекуператора), во-первых, выявил хорошую сходимость качественного проявления особенностей работы рекуператоров в зимних условиях с количественным описанием процесса замерзания инея, и, во-вторых, позволил получить некоторые конкретные рекомендации по наиболее эффективно применению рекуператоров в таких условиях. □